EL COSMOS

Hermann Bondi

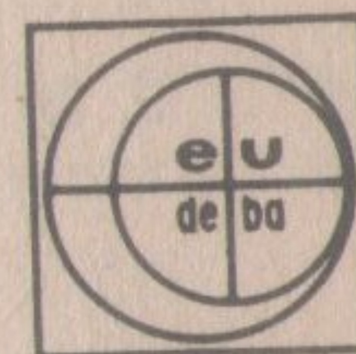


EL COSMOS

CIENCIA JOVEN

HERMANN BONDI

EL COSMOS



EDITORIAL UNIVERSITARIA
DE BUENOS AIRES

Título de la obra original:

THE UNIVERSE AT LARGE
Doubleday & Company, Inc., Nueva York, 1960

Traducida por
NÉSTOR MÍGUEZ

La revisión estuvo a cargo del
departamento técnico de la Editorial

Quinta edición: marzo de 1977

Sexta edición: Septiembre de 1980



EUDEBA S. E. M.
Fundada por la Universidad de Buenos Aires

La *Colección Ciencia Joven* está constituida principalmente por libros publicados en la *Colección de Estudios Científicos (Science Study Series)*, editada en Watertown, Massachusetts, como parte de un nuevo enfoque de la enseñanza y del estudio de la física.

Estos libros, escritos por autores destacados, ofrecen al estudiante y al público en general una visión de los temas más apasionantes y fundamentales de la física, visión que se extiende desde las partículas más pequeñas hasta el universo en su totalidad. Algunos de los libros exponen el papel que desempeña la física en el mundo del hombre, en su tecnología y en su civilización. Otros son de naturaleza biográfica y narran las fascinantes historias de los grandes descubridores y de sus descubrimientos. Los autores han sido elegidos teniendo en cuenta su competencia en los campos que abarcan y su habilidad para transmitir en forma interesante los conocimientos especializados que poseen, así como sus propias opiniones. El propósito primordial es ofrecer un panorama serio de la física, al alcance del joven estudiante y aun del profano. Es de esperar que muchas de las obras alienten al lector a investigar por sí mismo los fenómenos naturales.

La Colección de Estudios Científicos nació en 1956, cuando un grupo de físicos, profesores de escuelas secundarias, periodistas, proyectistas de instrumentos, productores cinematográficos y otros especialistas se reunió en el *Instituto Tecnológico de Massachusetts* (MIT) y organizó la *Comisión para el Estudio de la Física*. Dichas personas aportaron su conocimiento y su experiencia para proyectar y crear medios para el aprendizaje de la física. La *Fundación Nacional para la Ciencia (National Scien-*

ge Foundation) apoyó inicialmente este esfuerzo y continuó luego proporcionando su ayuda. También se recibió el apoyo de la *Fundación Ford*, del *Fondo para el Adelanto de la Educación*, y de la *Fundación Alfred P. Sloan*. La Comisión está preparando también películas de divulgación científica, aparatos de diseño especial, una guía de laboratorio, libros de texto y de consulta para profesores. Como puede apreciarse, todo un programa integral para la enseñanza de una ciencia que día a día abre a la humanidad nuevas perspectivas.

La *Colección de Estudios Científicos* está dirigida por un conjunto de personas de reconocida capacidad, entre las cuales hay físicos, escritores, educadores, editores, etc., que actúan en representación de importantes instituciones.

Al publicar en castellano los libros de la *Colección de Estudios Científicos*, la Editorial Universitaria de Buenos Aires entiende que ellos pueden servir con eficiencia a los mismos propósitos que motivaron su publicación en el país de origen.

La *Colección Ciencia Joven* se propone, además, suplir en parte la gran escasez, que tanto se hace sentir en nuestro idioma, de buenos libros de extensión y complementación de los conocimientos proporcionados por la enseñanza secundaria. Ello resultará útil tanto para estimular el interés de los estudiantes por la física y las ciencias afines como para descubrir y orientar la propia vocación; en tales aspectos serán un valioso auxiliar del profesor secundario.

Estos libros cumplirán también su cometido entre los estudiantes universitarios de física, ingeniería y

otras disciplinas que quieran conocer mejor esa revolución nacida en el seno de la física, que se extiende a otras ciencias y que está cambiando rápidamente la faz y los límites del mundo y nuestra forma de sentir y de pensar.

Prefacio

Este libro apareció originalmente en forma de una serie de artículos publicados en *The Illustrated London News*, semanario gráfico británico de gran prestigio, que dedica considerable espacio a la publicación de escritos científicos autorizados y didácticos. El autor es un distinguido matemático, físico y cosmólogo, conocido como uno de los tres principales defensores de la teoría del estado estable del universo en expansión. El lector se enterará por las páginas siguientes que hay actualmente dos escuelas principales de pensamiento (opuestas) en lo que se refiere al origen y el dinamismo del universo físico. La teoría del estado estable es una de ellas. El Consejo de Editores ha decidido publicar los artículos del profesor Bondi en la Serie de Estudios de la Ciencia, no solamente porque todo libro dirigido al lego y proveniente de un científico destacado es un raro don del que debemos apoderarnos sin vacilar, sino también porque los escritos del profesor Bondi tienen la virtud, pocas veces alcanzada, de la simplicidad. Al mismo tiempo que guiará al lector en esta gira por

el universo, le explicará las cosas que se ven en él con palabras que todos pueden comprender.

A pesar de no ser su lengua materna, el profesor Bondi escribe el inglés con notable fluidez (hecho que parece más frecuente en nuestra literatura que en otras). Nació el 1º de noviembre de 1919 en Viena, Austria, y allí recibió su educación primaria y secundaria. Su padre era médico, profesión que también siguió su hermana; pero Hermann, desde temprana edad, se manifestó sordo a la vocación familiar, que era para él demasiado angustiosa. En el Realgymnasium, equivalente de nuestra escuela secundaria, sintió despertar en sí un interés por las matemáticas y la física teórica que lo llevó a bucear por su propia cuenta en libros medianamente avanzados. En 1937 entró en el Trinity College de Cambridge, Inglaterra, para seguir el curso de matemáticas. Sus brillantes estudios le valieron una beca al cabo de un año y el grado de *Senior Scholar* después de dos.

Cuando la segunda guerra mundial estaba en su fase más grave, los británicos internaron a Bondi como ciudadano austríaco y le enviaron a Canadá. (Mientras tanto, su familia había escapado de Austria poco antes de la invasión de este país por Hitler y se había radicado en Nueva York, donde su padre ejerció la medicina hasta su muerte, ocurrida en 1959.) Bondi permaneció en Canadá hasta el verano de 1941 y luego volvió a Cambridge, que en su ausencia le había otorgado el título de B. A. Después de realizar algunas investigaciones en hidrodi-

námica, integró el equipo destinado a trabajar en un proyecto secreto del Almirantazgo sobre radar. Aquí se encontró con Fred Hoyle, el astrofísico, quien despertó en Bondi el interés por la astronomía y la cosmología. Juntos, y en ocasiones durante su trabajo oficial, se las ingeniaron para llevar a cabo un estudio muy importante sobre la interacción del gas interestelar y las estrellas. Por su participación en este trabajo, Bondi fue nombrado Miembro del Trinity College en 1943. Fue también durante la ejecución de ese proyecto del Almirantazgo cuando él, Hoyle y Thomas Gold iniciaron la colaboración intelectual que ha hecho de ellos los tres grandes de la teoría del estado estable.

Cuando Bondi asumió su cargo como miembro del Trinity College, en 1945, se le otorgó una cátedra de profesor adjunto en la Universidad de Cambridge. A pesar de sus obligaciones en la cátedra y en el laboratorio de investigación, y de su gusto por el bridge, halló tiempo para colaborar con Hoyle en problemas de física matemática y con Raymond Arthur Lyttleton en astronomía. En 1947 casó con Christine Mary Stockman, una discípula de Hoyle, con la que luego publicó una serie de artículos sobre la estructura estelar. Los Bondi tienen tres hijas y dos hijos.

La casa de los Bondi en Cambridge se convirtió en un lugar de reunión de Hoyle, Gold y otros colegas, en el que las prolongadas conversaciones sobre la estructura del universo dieron como fruto, en 1948, un artículo conjunto de Bondi y Gold que

fue la primera formulación de la teoría del estado estable. Poco después, Hoyle publicó otro artículo en el que llegaba a las mismas conclusiones por una vía diferente.

Bondi abandonó Cambridge en 1954 para hacerse cargo de la cátedra de profesor de Matemática Aplicada en el King's College de la Universidad de Londres. Estuvo un tiempo en la Universidad de Cornell (1951) como investigador adjunto y tuvo un cargo similar en el Observatorio del Harvard College (1953). Durante el último año dictó las Conferencias Lowell, en Boston. Es miembro de la Royal Astronomical Society, de la que es secretario desde 1956; miembro de la Royal Society y de la Cambridge Philosophical Society. Además de los numerosos artículos técnicos que ha publicado, es autor de *Cosmology* (Cambridge University Press, 1952), cuya revisión ha emprendido ahora para incorporar en él los últimos desarrollos. Últimamente se ha dedicado a la teoría de la gravitación y la relatividad general; también ha hecho contribuciones a los problemas de la masa negativa y de las ondas gravitacionales. Bondi se describe a sí mismo como un "lector perezoso", que prefiere enterarse de la labor de sus colegas verbalmente, en lugar de escudriñar los periódicos técnicos. Esta preferencia por la trasmisión personal, pero efectiva, de las ideas científicas es, quizá, lo que ha contribuido a dar a *El Cosmos* su estilo tan fluido.

JOHN H. DURSTON

Capítulo 1

Expansión del universo

La manera convencional de describir el universo del astrónomo es comenzar por la Tierra y marchar luego hacia el espacio exterior. En este ensayo, en cambio, comenzaremos por los más lejanos objetos celestes observables y nos acercaremos progresivamente a nuestro habitáculo. Este método de proceder requiere alguna justificación. Es cierto que comenzamos con lo que resulta menos familiar, con los objetos acerca de los cuales menos se conoce. Siempre nos asalta la sospecha de que hallaremos la simplicidad cuando vamos a lo muy, muy grande o a lo muy, muy pequeño. Tal modo de pensar es razonable, pues sabemos que nosotros mismos estamos entre las cosas más complejas que produce la naturaleza y que la enorme complejidad de los animales superiores parece corresponder a una dimensión que es mucho mayor que la escala atómica y mucho menor que la escala astronómica. Quizás esta enorme complejidad de la que somos un ejemplo se halla asociada con el tamaño, y tanto

en lo muy, muy pequeño, como en lo enormemente grande la naturaleza es más simple que en nuestra escala media.

Claro que también es posible tomar una actitud diferente. Se podría decir que el progreso natural de la ciencia consiste en comenzar con muy poco conocimiento, elaborar teorías basadas en este conocimiento, luego realizar ulteriores observaciones que vayan complicando el cuadro y así sucesivamente hasta llegar a lo muy complejo. Cuando tomamos en consideración lo muy, muy grande, es tan poco lo que sabemos que apenas disponemos de unos pocos elementos de información para incorporar a nuestras teorías. Esto no quiere decir que esas teorías sean deficientes. Tratamos de que nuestras teorías actuales sean lo mejor posible para el estado presente de nuestro conocimiento. En ciencia, no es útil suspirar por una información exhaustiva, sino que es menester trabajar con lo que se tiene y tratar de realizar la mejor tarea posible en el momento.

Métodos de la ciencia

Ésta puede ser una buena oportunidad para examinar los métodos de la ciencia. Para el lego, la ciencia presenta a menudo el aspecto de una terrorífica mezcla de datos, con muy pocos elementos humanos e inspirados en todo ello. Para el científico activo, está tan llena de interés y de fascinación que solo puede sentir piedad por el lego. El carácter imaginativo de la ciencia es más evidente en algunas de sus ramas que en otras. Pero hay algunos rasgos que son comunes a todo el ámbito de la labor científica: son los métodos de la ciencia. Cuando una actividad se desarrolla a la velocidad y con el ímpetu que caracterizan actualmente a la investigación científica, a menudo es difícil detenerse para examinar qué es lo que se está haciendo. Afortunadamente, lo han hecho para nosotros los filósofos de la ciencia y ninguno con tanta hondura, comprensión y exactitud como Karl Popper, cuyo libro sobre el tema, publicado hace más de veinte años, ha aparecido recientemente en una traducción inglesa *. Su análisis es tan profundo y suena tan verdadero que puede ser útil describirlo aquí brevemente. El punto esencial que Popper destaca es que la base real de la ciencia es la posibilidad de refutación empírica. No es la prueba lo que es importante en la ciencia. Por el contrario, Popper sostiene que nunca puede darse una prueba. En cambio, podemos afirmar que ciertos enunciados son definidamente incorrectos. Podemos *refutarlos*.

De acuerdo con la descripción de Popper, el científico formula una teoría inspirada, claro está, en el conocimiento existente. Luego, usa esta teoría para hacer predicciones acerca de lo que deben revelar nuevos experimentos, de cuáles deben ser —según la teoría— los resultados de nuevas ob-

* Popper, Karl R., *Logic of Scientific Discovery*, Basic Books, 1959.

servaciones. Si luego estos experimentos se llevan a cabo y los pronósticos difieren de la teoría, sabremos que ésta es errónea. En cambio, si los experimentos concuerdan con la teoría, es tarea de ésta predecir otros experimentos nuevos que la pongan a prueba otra vez, y así sucesivamente. Ninguno de estos ensayos puede probar la teoría, pero cualquiera de ellos puede refutarla. Pues, aun cuando al llegar a cierto punto todos los experimentos concuerden con la teoría, puede haber otros en el futuro que demuestren, a pesar de todo, que esa teoría era equivocada. En realidad, este parece ser el destino de muchas teorías científicas, por grande que haya sido su éxito durante largo tiempo. El caso más famoso es el de la Ley de la gravitación, de Newton, que fue el fundamento sobre el cual los astrónomos predijeron exitosamente las posiciones de los planetas y de la Luna, los eclipses y los muchos fenómenos del sistema solar durante más de doscientos años. Luego, apareció una nueva teoría de la gravitación, la de Einstein. Resultó que las predicciones de la teoría de Einstein eran casi idénticas a las de la teoría de Newton, de modo que todas las pruebas concordantes con las previsiones de la teoría de Newton estaban de acuerdo con las de la teoría de Einstein. Pero había una ligera diferencia entre ambas teorías en uno o dos pequeños detalles. En estos casos, las observaciones dieron la razón a Einstein y se la negaron a Newton. Por consiguiente, a pesar del enorme número de casos en que la teoría de Newton era correcta, ya

no se la considera verdadera en ningún sentido; pero sabemos que, exceptuando unos pocos detalles muy pequeños, la teoría de Newton dará las mismas respuestas que la de Einstein. Como la teoría de Newton es, matemáticamente, mucho más simple que la de Einstein, continuamos usándola como una herramienta útil en la labor astronómica, pero no como algo en cuya verdad creemos, en ningún sentido de la palabra *verdad*.

En cosmología, nombre que recibe la ciencia que estudia el universo en gran escala, debemos observar muy cuidadosamente las reglas de la labor científica, pues es tan poco lo que se conoce, a la par que el tema nos atrae tanto y excita de tal modo nuestra imaginación que, a menos que tomemos muchas precauciones, corremos el riesgo de extraviarnos. El procedimiento que debemos seguir es el mismo que en todas las ciencias: debemos formular teorías con vistas a que sus predicciones puedan ser puestas a prueba por la observación. Cuanto mayor sea el número de predicciones que pueda realizar una teoría, tanto más vulnerable será a la refutación por medio de las observaciones; cuanto más susceptible de ensayo, tanto mejor es la teoría. Sin embargo, por mucho que nos atraiga el cuadro esbozado por una teoría, el propósito de ésta es sugerir observaciones que puedan refutarla. Es con este objetivo que debemos tomar en consideración los datos de que disponemos acerca del universo.

El rasgo más sorprendente del universo es, probablemente, su expansión. ¿Cuál es exactamente el indicio que tenemos de ésta y cuál es la fuerza de esa evidencia? En la lámina I presentamos un cuadro que exhibe, en una forma sorprendente, algunos de esos elementos de juicio. En la columna izquierda hay una serie de fotografías de galaxias. Todas fueron tomadas con el mismo telescopio y con el mismo aumento. A la derecha, vemos los espectros de esas galaxias. Ahora bien, ¿qué es, ante todo, un espectro? Es bien sabido que la luz blanca es una combinación de todos los colores y que, con métodos apropiados, es posible descomponer esa luz en los colores que la constituyen. El arco iris es un ejemplo familiar de esto. Otro medio más accesible para obtener la descomposición de la luz blanca, consiste en usar un prisma de vidrio o de algún otro material adecuado; con él es posible desplegar toda la banda de colores de la luz solar. Si se usa un prisma que disperse muy claramente la luz solar, se observará que los colores no forman una banda continua, sino que, en muchos lugares, hay líneas oscuras que atraviesan el espectro. El origen de estas líneas es bastante complejo. En lo fundamental, se deben a que la luz del Sol atraviesa los gases más fríos de la atmósfera solar y estos gases son opacos a ciertos colores particulares, a matices de esos colores, por lo cual dejan oscura una parte del espectro. El astrónomo dispone de espectroscopios de gran poder para analizar la luz de las estrellas individuales y también de las galaxias individuales. Como es de suponer, la luz que se puede recolectar es escasa, particularmente de las galaxias muy distantes, y debido a eso, y también a otras razones más técnicas, el espectro de una galaxia no es tan claro como el del Sol. Sin embargo, algunas de las más pronunciadas líneas oscuras aparecen aun en los espectros de esas galaxias lejanas. El fenómeno verdaderamente notable descubierto hace unos cuarenta años es que esas líneas no están donde debieran estar, por ejemplo, donde están en el caso del espectro del Sol, sino que se encuentran desplazadas; están corridas. El corrimiento es siempre hacia el rojo, como lo indican las ilustraciones de los espectros que aparecen en la lámina I. Se observará que cuanto más tenue y más pequeña parece la galaxia, tanto mayor es el corrimiento del espectro hacia el rojo. Tal es la descripción completa de los resultados de la observación directa. Se observa un corrimiento hacia el rojo del espectro, corrimiento que parece relacionado con el brillo aparente de la galaxia, de modo que cuanto más tenue es ésta, tanto mayor es el corrimiento hacia el rojo. A partir de este punto comenzaremos a hacer una serie de interpretaciones.

Corrimiento hacia el rojo

En primer lugar, ¿qué explicación puede darse de ese corrimiento hacia el rojo? ¿En cuáles otras cir-

cunstancias se observan corrimientos hacia el rojo? La respuesta es que, exceptuando un caso más bien insignificante, el corrimiento hacia el rojo indica siempre una velocidad de alejamiento. Este fenómeno es poco familiar en el caso de la luz, pero se lo observa comúnmente en el caso del sonido. Si un tren pasa velozmente junto a nosotros mientras suena el silbato de su locomotora, observaremos que —para nuestro oído— la altura del silbato cae acentuadamente en el momento en que el tren pasa delante de nosotros. No es difícil comprender la razón de esto. El silbato produce un sonido; el sonido es una vibración del aire en la que se suceden periódicamente presiones máximas y mínimas; esas vibraciones llegan hasta nuestro oído, donde se convierten en impulsos nerviosos que penetran en nuestra conciencia. Mientras el tren se aproxima, cada presión máxima tiene que atravesar una distancia menor para llegar hasta nosotros. Por eso, el intervalo entre la recepción de las presiones máximas será menor que el intervalo entre sus emisiones. Decimos entonces que la altura de la nota se ha elevado. A la inversa, cuando el tren se aleja de nosotros, cada presión máxima sucesiva tiene que atravesar un trayecto mayor, por lo cual las presiones máximas llegarán a nuestros oídos en lapsos mayores que los de su emisión. En consecuencia, la altura es menor. La medida en que aumenta o disminuye la altura depende de la proporción de la velocidad del tren a la del sonido, que es de unos 336 metros por segundo.

Muy similar es lo que ocurre con la luz, solo que, en este caso, el aumento en la altura del sonido se convierte en un corrimiento hacia el violeta; el corrimiento hacia el rojo equivale al descenso de la altura. La velocidad crucial es ahora, no la del sonido, sino la velocidad mucho mayor de la luz, 298.000 kilómetros por segundo. Por lo tanto, un corrimiento hacia el rojo indica una velocidad de alejamiento de la fuente emisora, velocidad que está respecto de la luz en la proporción expresada por la magnitud del corrimiento hacia el rojo, esto es, por el cambio en longitud de onda dividido por la longitud de onda. Las velocidades, deducidas de este modo, de los corrimientos hacia el rojo observados, aparecen en el lado derecho de la lámina I. Esa velocidad de alejamiento es, pues, la única causa del corrimiento hacia el rojo que podemos inferir de nuestro conocimiento terrestre de la física. ¿Qué ocurre con las otras características del cuadro, las características de las fotografías de la izquierda, la luminosidad y el tamaño cada vez menores? Todos sabemos que un objeto de un determinado brillo parece tanto más tenue cuanto más lejos se encuentra. En astronomía, hay muy pocos elementos de juicio, aparte de éste, que nos suministren indicios de las distancias de esas galaxias que vemos tan alejadas. Por consiguiente, si interpretamos la débil luminosidad de las galaxias como índice de sus distancias y los corrimientos hacia el rojo en los espectros, como velocidades de receso, hallamos que esta

velocidad de alejamiento es proporcional a la d
tancia del objeto.

Velocidad de las estrellas que se alejan

De la relación entre el corrimiento hacia el ro y el brillo hemos inferido una "ley de la relación e tre la velocidad y la distancia". Durante mucho tie po, los físicos y los astrónomos se sintieron m incómodos con estas enormes velocidades de al jamiento que parecen deducirse de sus observaci nes. Sostenían que todas nuestras interpretacion se basaban en nuestro conocimiento local de la f sica y que, en las profundidades del universo, p dían tener lugar efectos desconocidos que desfig raran de algún modo el aspecto con que aquél s nos aparece. En la actualidad no prestamos oídos este género de argumentos. Pues la expansión d universo no se revela solamente mediante la obse vación del espectro. Hemos observado también l notable uniformidad del universo; hemos visto que en todas las direcciones a nuestro alrededor, pre senta el mismo aspecto, con que solo penetremos bastante lejos en él. Entonces, si suponemos que e universo es en realidad uniforme, en escala muy grande, podemos plantear la siguiente cuestión ma temática: ¿Cómo puede moverse y, no obstante ello, mantener su uniformidad? La respuesta es que solamente puede moverse de manera tal que la velocidad de todo objeto se halle en la línea de la visual

sea proporcional a su distancia. Este es el único tipo de movimiento que puede mantener la uniformidad. Por eso, llegamos nuevamente a la conclusión de que una expansión con una velocidad de alejamiento proporcional a la distancia, es una consecuencia natural de la hipótesis de la uniformidad, que está igualmente basada en la observación. Además, si tratamos de elaborar una teoría acerca del universo, cualquiera sea la manera en que lo hagamos, llegamos siempre a la conclusión de que ese universo debe estar en movimiento, con objetos que presentan velocidades proporcionales a sus distancias.

Debo insistir nuevamente en la uniformidad del sistema. Al suponer esto no nos colocamos en una posición privilegiada, sino todo lo contrario, en una posición típica. Suponemos que el universo presenta el mismo aspecto ante los observadores de cualquier otra galaxia. Tales observadores verían los mismos efectos; verificarían la misma relación entre el corrimiento hacia el rojo y el brillo. Aunque en este terreno nadie puede estar seguro de nada, vemos que hay diferentes líneas de razonamiento que llevan todas a la conclusión de que es menester tomar los corrimientos hacia el rojo como indicadores de una velocidad de receso proporcional a la distancia de los objetos celestes observados. Si dividimos la distancia a que se encuentra cualquier galaxia por su velocidad de alejamiento de nosotros, obtendremos siempre el mismo número, sea cual fuere la galaxia que elijamos. Esto se deduce de la proporcionalidad entre la velocidad y la distancia.

Ese número expresa un intervalo que, de acuerdo con las investigaciones más recientes, es de unos 10.000 millones de años. De una u otra manera, éste es el tiempo característico del universo.

Capítulo 2

¿Por qué está oscuro de noche?

Una de las bases de la cosmología moderna recibe el nombre de la paradoja de Olbers, por la cual la oscuridad del cielo nocturno adquiere las características de un fenómeno sumamente curioso. El razonamiento que nos conduce a esta conclusión es tan simple, interesante y bello que no estará de más considerarlo aquí con detalle.

Cuando miramos al cielo de noche, observamos que hay algunas estrellas muy brillantes, un número mayor de estrellas de brillo medio y un número muchísimo mayor de estrellas débiles. Es fácil ver que este fenómeno puede explicarse por el hecho de que las estrellas brillantes están cerca, las de brillo medio están más lejos y las muy débiles están a distancias mucho más grandes que las anteriores. De esta manera, no solamente se explican las variaciones en el brillo, sino también el hecho de que hay más estrellas débiles que estrellas de brillo medio y más de éstas que de las muy brillantes, pues cuanto mayor es la distancia mayor es la cantidad de espacio intermedio. Podemos imaginar, entonces,

que hay estrellas muchísimo más lejanas aún, ta lejanas que no pueden ser vistas individualment ni a simple vista ni en el telescopio. Surge entonc la cuestión de saber si estas estrellas muy distante aunque individualmente sean demasiado débiles para que se las pueda ver, pueden existir en númer tan grande como para dar al cielo nocturno un iluminación de fondo uniforme. Tal es el problem que planteó el astrónomo alemán Olbers hace má de ciento treinta años. Presentaremos ahora el argumento en la forma propia del conocimiento astronómico de 1826, sin tomar en cuenta ningun de los fenómenos descubiertos por la astronomí moderna.

Paradoja de Olbers

Olbers intentó calcular, sobre esta base, cuál debería ser el brillo del fondo del cielo. Inmediatamente comprendió que, al tratar de considerar los efectos de regiones que están demasiado alejadas para poder ser vistas con detalle, se veía obligado a hacer suposiciones acerca de las características de las profundidades del universo. Adoptó un conjunto de hipótesis tan plausibles, aun para nuestros días, que pueden servir como modelo de lo que debe ser el comienzo de una investigación científica. En primer lugar, supuso, a la luz del conocimiento de su época (1826), que las regiones distantes del universo son muy similares a la nuestra. Supuso que

debía de haber estrellas en esas regiones con una distancia media entre ellas similar a la que hay entre las estrellas próximas a nosotros. Supuso que, si bien cada estrella tiene un brillo intrínseco peculiar, debía haber un brillo estelar medio como el que hay en nuestra vecindad astronómica. En otras palabras, supuso que la imagen que tenemos del universo es la misma en todas partes. Esta hipótesis se halla en completo acuerdo con las ideas que han predominado desde los tiempos de Copérnico, es decir, que nuestra posición dentro del esquema del universo no tiene nada de especial, nada de preseleccionado. Desde el punto de vista científico, ésta es una hipótesis muy conveniente y fructífera porque podemos suponer que lo que ocurre en nuestro alrededor ocurre también en todas partes, si no en los detalles, al menos en promedio.

Desgraciadamente, esta hipótesis no es suficiente para los cálculos que Olbers deseaba hacer. Pues la luz viaja a una velocidad finita, muy elevada, es cierto, pero no obstante finita. La luz que recibimos actualmente de muchas regiones distantes fue emitida hace mucho tiempo, lapso durante el cual tuvo que cubrir la distancia que hay entre esas regiones y nosotros. Por eso, lo importante para nosotros al tratar de calcular la cantidad de luz que recibimos de las profundidades del universo, no es saber cuánta luz irradian esas estrellas *ahora*, sino cuánta luz irradiaron en la época en que la luz que actualmente recibimos de ellas fue lanzada al espacio. Es decir, no solamente tenemos que hacer hipótesis re-

lativas a la variación de las condiciones astronómicas en el espacio, sino también en el tiempo. Olbers hizo, nuevamente, la más simple de las hipótesis posibles, pues supuso que el tiempo importa tan poco como el espacio; en otras palabras, que no solamente en todas las partes del universo, sino en todos los tiempos hubo estrellas, que su brillo fue siempre el mismo de nuestra vecindad astronómica y, también, que su distancia media entre ellas fue siempre la misma que en nuestras proximidades. Luego, Olbers supuso, suposición muy natural, que las leyes de la física, tales como las conocemos en la Tierra, tienen vigencia en todas partes y en todos los tiempos. Supuso, en particular, que las leyes de la propagación de la luz —la manera como la luz se difunde después de abandonar su fuente— son válidas en esas vastas regiones así como lo son a nuestro alrededor. También ésta es la más obvia, la más conveniente y la más fructífera hipótesis que se puede hacer. Sería una actitud tonta iniciar un viaje para explorar las profundidades del universo echando por la borda todo el conocimiento que hemos adquirido en nuestra vecindad. Finalmente, Olbers hizo una suposición que es de la mayor importancia, pero la hizo implícitamente. Ni siquiera era consciente de que estaba haciendo una suposición. Los científicos saben muy bien que este tipo de suposiciones es el más peligroso de todos. En esa hipótesis se suponía que no hay grandes movimientos sistemáticos en el universo, que el universo es estático.

Sobre la base de estas cuatro hipótesis es fácil hallar cuál es la luz de fondo del cielo. Imaginémonos que estamos rodeados por un gran caparazón esférico hueco (ver fig. 1). Se supone que el espesor del caparazón es pequeño comparado con su diámetro, pero todo el caparazón es tan grande, que hay gran número de estrellas entre sus bordes. ¿Cuántas estrellas hay en éstos? Para llevar a cabo este cálculo debemos conocer el volumen del caparazón. Si a su radio lo llamamos R y a su espesor

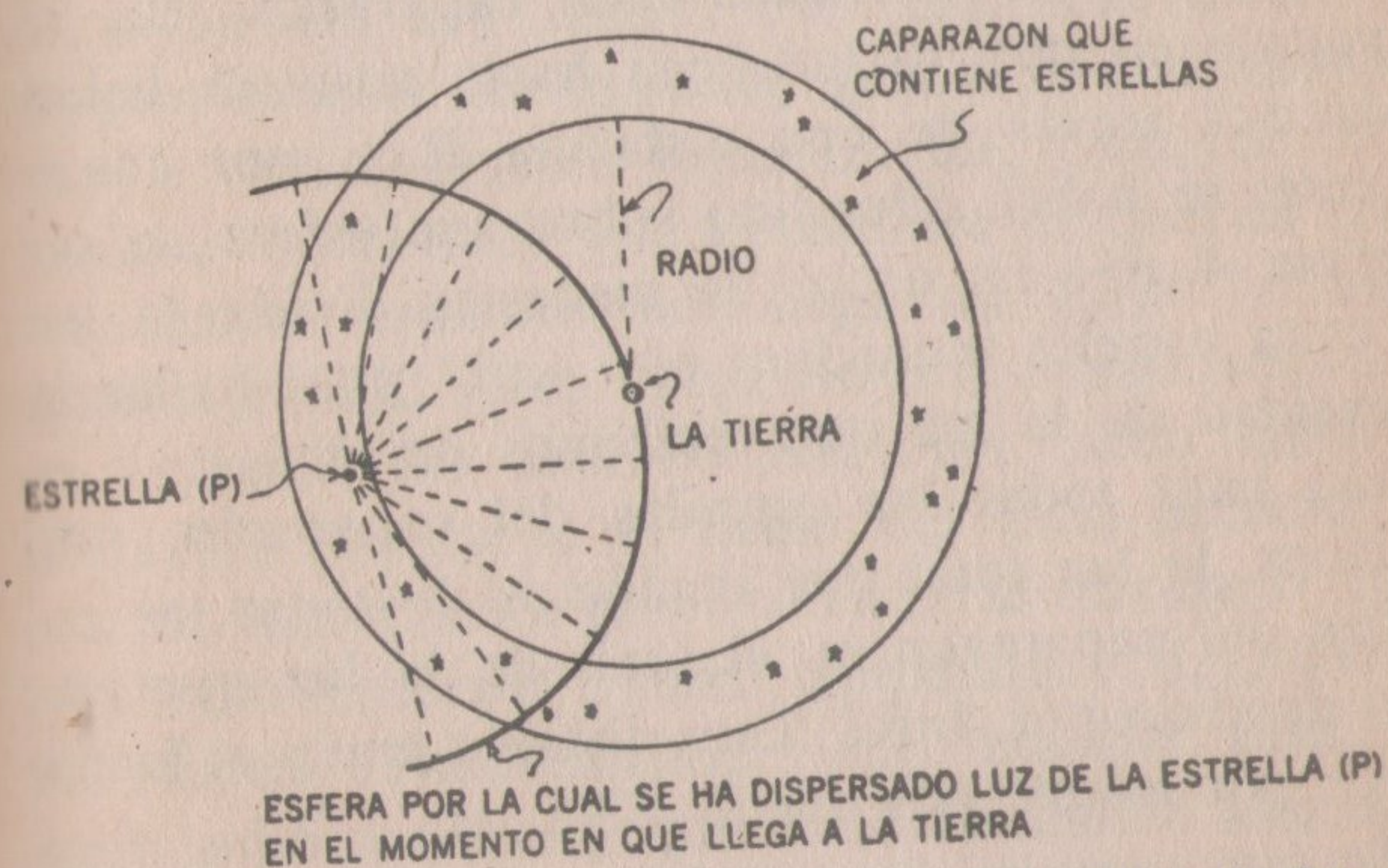


FIG. 1. Cada estrella emite una gran cantidad de luz, pero solo una pequeña fracción de ella llega hasta la Tierra. No obstante esto, hay tantos millones de estrellas, que debería llegar a nosotros una gran cantidad de luz. De todos los caparazones de igual espesor deberíamos recibir igual cantidad de luz. Si esto fuera así, el cielo sería brillante y no habría día, noche, ni vida alguna sobre la Tierra.

H, vemos inmediatamente que la superficie de la esfera sobre la cual está construido el caparazón es $4\pi R^2$; luego, el volumen del caparazón será, aproximadamente, $4\pi R^2 H$. Si N es el número de estrellas por unidad de volumen, entonces el número de estrellas en el caparazón del volumen $4\pi R^2 H$ será $4\pi R^2 HN$. ¿Cuánta luz emitirán todas las estrellas del caparazón? Si el promedio de emisión de luz de una estrella individual es L, entonces todas las estrellas del caparazón juntas emitirán $4\pi R^2 HNL$. Pero, lo que nos interesa no es cuánta luz emiten, sino cuánta luz recibimos de ellas. Consideremos la luz de una estrella particular del caparazón. En el momento en que su luz llega hasta nosotros habrá viajado a través de una distancia R y, por consiguiente, se habrá difundido sobre una esfera de superficie $4\pi R^2$. Es decir, es menester dividir la luz de cada estrella individual por $4\pi R^2$ para hallar la intensidad de la luz que recibimos de ella. Esto es válido para todas las estrellas del caparazón; por lo tanto, la luz total que recibimos de todas las estrellas del caparazón es el total de la luz que envían dividido por $4\pi R^2$. Esta división anula el factor $4\pi R^2$, por lo que nos queda HNL.

En esta cantidad final, HNL, no figura para nada el radio del caparazón. La cantidad de luz que recibimos de cualquier caparazon es la misma, independientemente del radio del caparazón. Por lo tanto, si sumamos un caparazón tras otro, puesto que recibimos la misma cantidad de luz de cada uno de ellos, la cantidad de luz que nos llega aumentará más y más, sin límites. Según esto, debemos estar recibiendo una cantidad infinita de luz de todos los caparazones que se extienden hasta el infinito. Pero este razonamiento, no solamente conduce a una conclusión absurda, sino que tampoco es correcto. Pues cada estrella, además de emitir luz, obstruye la luz de las estrellas que están detrás de ella. En otras palabras, no recibiremos la luz de las estrellas de las capas muy distantes porque, por lo general, habrá una estrella cercana, entre esas capas y nosotros, que intercepte su luz. Como se comprenderá, las estrellas emiten mucha luz, considerando la pequeña superficie que tienen. Por eso, este efecto de oscurecimiento no será muy grande. Puede impedir que la suma aumente infinitamente, pero, de todos modos, el resultado que obtenemos es que de todas esas capas estelares nos llega un flujo luminoso igual a 50.000 veces la luz del Sol, cuando éste está en el cenit. De acuerdo con esto, pues, tanto de día como de noche el brillo del cielo debería ser extraordinariamente grande. Todo se quemaría, pues ese brillo equivale a una temperatura de 10.000° Fahrenheit. Naturalmente, este notable resultado sorprendió a Olbers, que trató de hallar una solución para este problema. Pensó que el flujo luminoso debe hallar en su camino nubes de materia oscurecedoras, entre nosotros y esas estrellas distantes. Pero esta solución no es válida. Pues si hubiera tales nubes, éstas deberían calentarse al absorber la luz de las estrellas. Al calentarse más y más, finalmente

deben irradiar tanta luz como la que reciben de las estrellas y, por lo tanto, no serían una protección durante mucho tiempo. Se han intentado otras soluciones para este problema, pero ninguna de ellas es correcta. Por consiguiente, nos vemos conducidos inevitablemente a concluir que, sobre la base de las suposiciones de Olbers, debemos recibir un flujo luminoso que, de hecho, no se observa.

Expansión y oscuridad

Este breve razonamiento puede servir muy bien como prototipo de razonamiento científico. Comenzamos con una teoría, o sea, con el conjunto de hipótesis de Olbers. Mediante un razonamiento lógico, hemos deducido de ella consecuencias que pueden ser sometidas a observación, es decir, el brillo del cielo. Hemos hallado que las predicciones de la teoría no concuerdan con la observación. Luego, las suposiciones sobre las que se basa la teoría deben ser erróneas. Como resultado de la labor de Olbers, sabemos que, sea lo que fuere lo que ocurre en las profundidades del universo, no podemos concebir éstas según el cuadro que se deriva de esas suposiciones. Es por este método de refutación empírica que hemos descubierto algo acerca del universo y que hemos convertido la cosmología en una ciencia.

A fin de escapar de la paradoja debemos abandonar, al menos, una de esas hipótesis. A la luz del

conocimiento moderno descrito en el capítulo anterior, el lector hallará dificultad en discernir cuál de esas suposiciones es necesario abandonar. Es la hipótesis de que el universo es estático. Si el universo se está expandiendo, las estrellas distantes se alejarán de nosotros a las más altas velocidades; además, se sabe por la física que la luz emitida por una fuente que se aleja se reduce en intensidad, comparada con la de una fuente en reposo. En un universo en expansión como aquel en el cual vivimos puede, en realidad, estar oscuro durante la noche, pues la luz de las capas estelares distantes se halla enormemente debilitada por el hecho que los objetos luminosos que hay en ellas se alejan de nosotros a gran velocidad. Así, pues, la oscuridad del cielo nocturno, la más obvia de todas las observaciones astronómicas, nos conduce directamente a inferir la expansión del universo, este notable y extraordinario fenómeno descubierto por la astronomía moderna.

Otros cambios que introdujo la astronomía moderna en las hipótesis de Olbers son relativamente secundarios. Es verdad que sabemos de nuestras estrellas que no continúan indefinidamente, sino que forman un gran sistema estelar, nuestra Galaxia; pero también sabemos que más allá de nuestra Galaxia hay millones y millones de otras galaxias, todas más o menos similares a la nuestra. Por consiguiente, podemos expresar el razonamiento de Olbers en un lenguaje moderno, si cambiamos estrellas por galaxias. La sustancia del argumento no se altera. Las galaxias, no solamente son objetos notables indivi-

dualmente (hay varios tipos de ellas), sino que también son extraordinariamente sociables. Muy pocas de ellas, si es que hay alguna, aparecen aisladas en el espacio. La mayoría se agrupa para formar cúmulos de galaxias. Algunos de estos cúmulos no contienen un número muy grande de miembros, como ocurre con nuestro propio cúmulo local de galaxias. Pero otros son extraordinariamente ricos y contienen un gran número de galaxias. Se supone que algunos llegan a tener hasta 10.000 o más galaxias individuales. Una de las principales tareas de la teoría cosmológica consiste, no solamente explicar la existencia de las galaxias mismas, sino también explicar el hecho notable de que constituyan esos vastos cúmulos.

Capítulo 3

Teorías cosmológicas

En el capítulo anterior nos hemos referido a algunos de los rasgos notables del universo: las galaxias, la uniformidad de su distribución por el cielo, la oscuridad del cielo nocturno, la expansión del universo y la formación de cúmulos de galaxias. Al igual que en otros campos de la ciencia, también en cosmología necesitamos una teoría que una y correlacione las observaciones mencionadas y otras de naturaleza más recóndita. Sin embargo, aquí como en otras ciencias la tarea principal de una teoría es predecir los resultados de nuevas observaciones, sugerir métodos que puedan destruir la teoría. De este modo, las teorías inspiran nuevas observaciones y es por ello que consideramos una tontería la sugestión de que es prematuro formular teorías cosmológicas y que es menester esperar reunir más información antes de elaborar teorías. No podemos esperar hasta tener todos los datos a nuestra disposición; este momento nunca llega. Tenemos que tratar siempre de hacer todo lo que podamos con los elementos de que disponemos. Claro que sería absurdo

considerar nuestras teorías actuales como infalibles o definitivas. Ninguna teoría científica puede pretender ser infalible, definitiva o tan solo verdadera. Su propósito es ser fértil, sugerir nuevas observaciones que den origen a nuevas ramificaciones del tema.

En un ámbito en el que se dispone de tan poca información como cosmología, no cabe sorprenderse, pues, de que haya diversas teorías en pugna. Todas ellas explican más o menos bien todas las observaciones actuales, pero difieren claramente en sus predicciones de cuáles serán las futuras. Hay dos de estas teorías que han recibido una atención particularmente grande. Sus consecuencias fueron elaboradas con cierto detalle; las describiremos, a continuación, brevemente.

Cosmologías relativistas: Un universo en evolución

La primera teoría, que más bien constituye una clase de teorías, recibe el nombre de cosmología relativista. Su fundamento lo forma la teoría general de la relatividad formulada por Einstein hace cuarenta y cinco años. Es la mejor teoría de la gravitación que tenemos. Concuerda con una enorme cantidad de observaciones sobre los efectos de la gravitación en el sistema solar. La cosmología relativista es, esencialmente, un intento por aplicar esta teoría sumamente exitosa de la gravitación al universo en su conjunto. Con este fin, es menester agregar otra hipótesis a ella, la hipótesis de la uniformidad en

gran escala del universo. Como hemos dicho antes, hay una considerable cantidad de evidencias astronómicas en favor de tal hipótesis. Sobre esta base pueden construirse muchos modelos del universo. Pero algunos de ellos parecen mucho más promisorios que otros como representaciones de nuestro universo real. De ésos, el más destacado es el de un sabio belga, el abate Lemaître. Este modelo comparte con todos los otros modelos de la cosmología relativista la propiedad de ser cambiante, esto es, concibe al universo en su totalidad como sujeto a cambios en el transcurso del tiempo.

Todo modelo que concibe al universo en su totalidad como sometido a cambios, recibe el nombre de modelo evolutivo. Todos los modelos de la cosmología relativista son modelos evolutivos. En el de Lemaître, el universo es finito, pero ilimitado. Aunque, a primera vista, parece una concepción un tanto rara, no hay nada de extraño en ella. Si, partiendo de un punto, me muevo en línea recta, me alejaré cada vez más de él; pero esto es exclusivamente una cuestión de experiencia local. Suponer que esto sigue siendo válido, por lejos que yo vaya, no es más que una hipótesis, es una extrapolación de un conocimiento adquirido localmente. Un universo finito es simplemente un universo en el cual, si avanzo en línea recta, eventualmente llegaré otra vez al punto de partida (después de una travesía sumamente larga, claro está). En dos dimensiones, esto nos es familiar por el caso de la Tierra. Si marcho siempre en la misma dirección, eventualmente llega-

ré de nuevo al punto de partida, después de haber circunvalado la Tierra. Es cierto que la superficie de la Tierra es bidimensional, pero se sugiere que lo mismo ocurre, en una escala enormemente mayor, en el universo de tres dimensiones. Por extraño y poco familiar que pueda parecernos esto, no es de sorprenderse que, cuando atravesamos distancias del orden de los miles de millones de años-luz, tengamos experiencias extrañas y poco comunes.

Explosión de Lemaître

En el modelo de Lemaître, aunque el volumen actual del universo es grande, en un comienzo era muy pequeño. Claro está que esta situación prevaleció hace mucho tiempo, quizás hace unos 40 mil millones de años. La misma cantidad de materia que ahora se extiende tenuemente por todo el universo, se hallaba entonces reducida a un espacio muy pequeño y, por consiguiente, era muy densa y muy caliente. Se produjo luego algún tipo de explosión nuclear y el universo comenzó entonces a expandirse rápidamente. Pero, debido a la gran densidad de la materia, la fuerza de la gravitación era muy grande; por eso, la expansión fue retardada por la fuerza de gravitación. En la relatividad general, además de la fuerza de gravitación común, se supone también la existencia de una fuerza de repulsión universal que aumenta con la distancia. Mientras el universo era pequeño y la materia muy densa, la gravitación era mucho más poderosa que esta fuerza de repulsión

a gran distancia. Pero, a medida que el sistema se expandía, se aproximaba a un estado en el que la fuerza de gravitación equilibraba exactamente la fuerza de repulsión. En el momento en que el sistema alcanzó este estado, el movimiento de expansión se retardó hasta llegar casi a detenerse, pero no se detuvo totalmente. Si el universo hubiera llegado a detenerse, habría permanecido ya siempre en este estado, debido al equilibrio entre la fuerza de gravitación y la fuerza de repulsión. Pero, como aún se expandía, aunque muy lentamente, permaneció en este estado de relativo equilibrio durante largo tiempo. Pero, luego, al expandirse un poco más allá de este equilibrio, la fuerza de repulsión comenzó a predominar sobre la gravitación. Por consiguiente, la expansión continuó y se aceleró; se hizo más veloz y continuará por siempre. De acuerdo con esta teoría, pues, estamos ahora en esta segunda fase de la expansión del universo.

En la primera fase de expansión, el gas, que era en un comienzo muy caliente se enfrió gradualmente. Se supone que el prolongado estado intermedio, cuando el universo estaba casi en reposo, pero no totalmente, fue la época en que el gas, ya por entonces bastante frío, se condensó en cúmulos de galaxias y éstas a su vez en galaxias individuales. En esta etapa, pues, la densidad de la materia era la adecuada para la formación de galaxias. Actualmente, cuando debido a la constante expansión la densidad es mucho menor, no pueden formarse nuevas galaxias. Este modelo del universo, por lo tanto, tiene

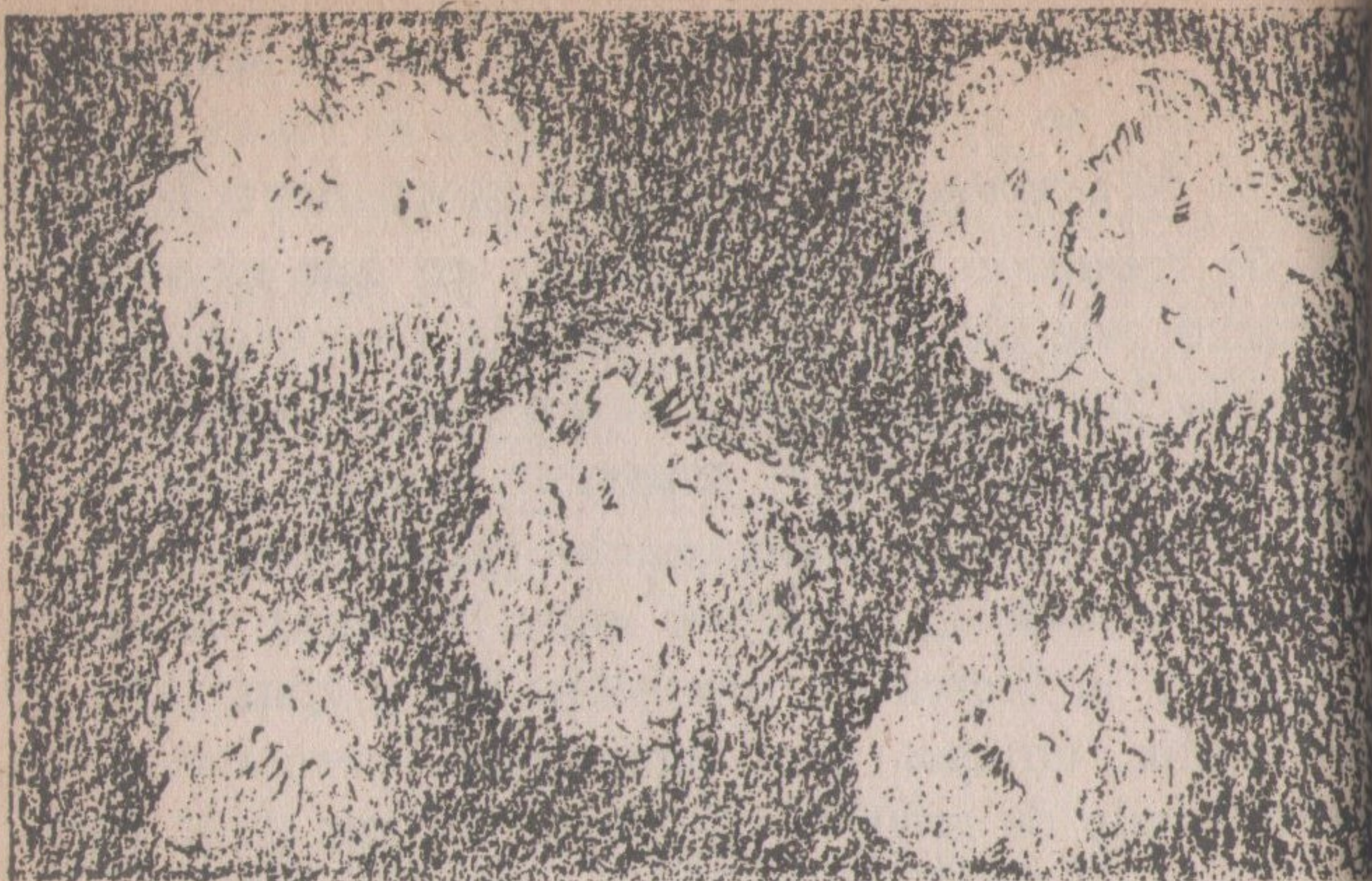


FIG. 2. En el universo joven, según Lemaître, el gas denso y caliente se expande rápidamente por todo el universo.



FIG. 3. En el universo adolescente, según Lemaître, el gas se ha enfriado y ha formado una enorme nube, como una bruma, que se encuentra en reposo.



FIG. 4. En el universo de edad mediana, según Lemaître, el gas se ha enfriado aún más, después de miles de millones de años, y llega a formar galaxias.



FIG. 5. En el universo de edad avanzada, según Lemaître, las galaxias se adecuan a la expansión del universo y se alejan unas de otras.

diversas fases. Una fase joven y exuberante de elevada temperatura y gran expansión; un período medio de condensación en galaxias, en un estado de casi completo reposo; y una edad provecta en la cual las galaxias, que también envejecen, se ale-

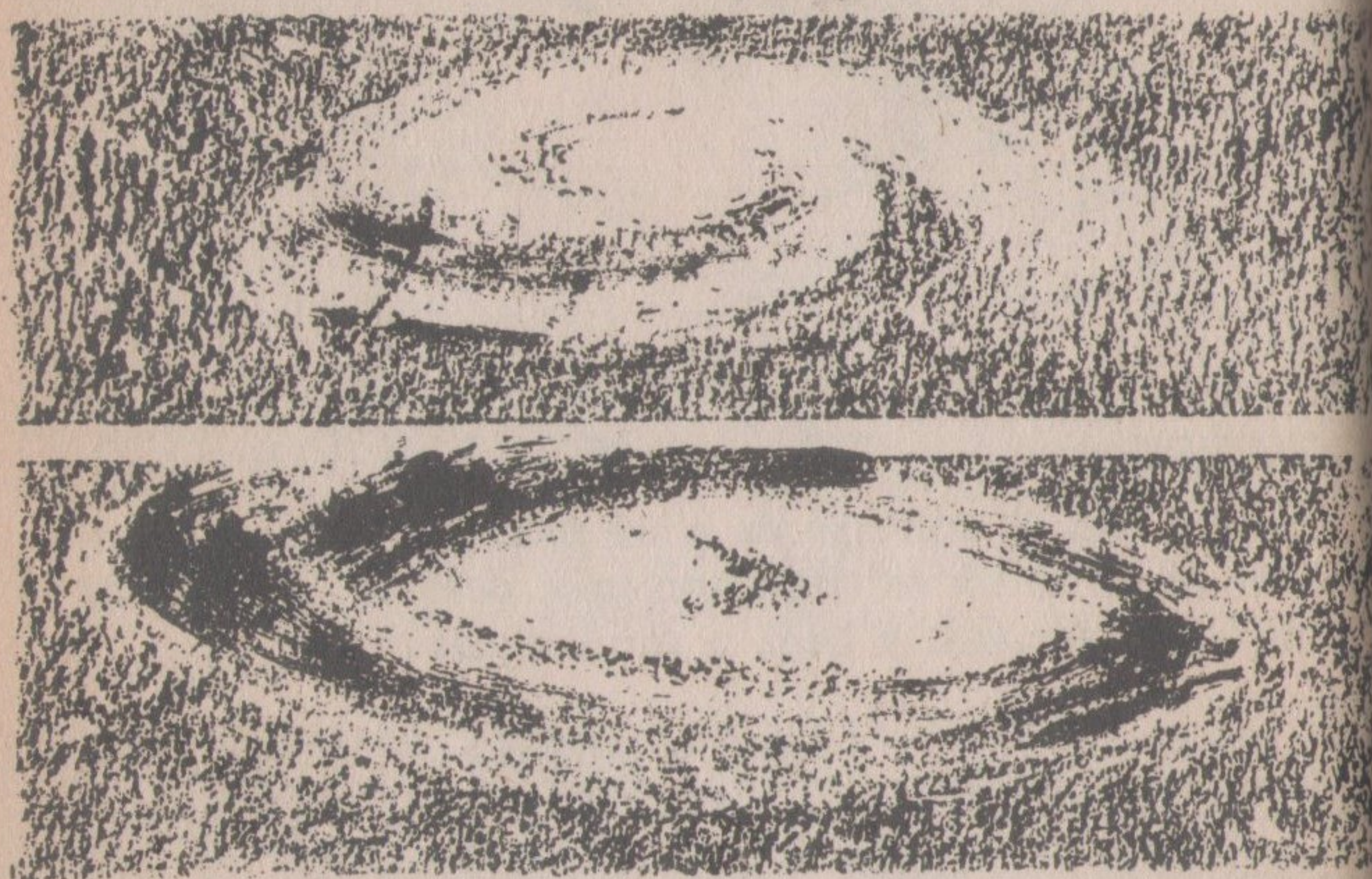


FIG. 6. Cómo adquiere forma una galaxia: en el curso del tiempo, la nube informe de gas comienza a rotar por contracción (figura de arriba), y a medida que aumenta la velocidad de rotación, el gas forma un disco achatado con una comba central (figura de abajo). Su diámetro puede llegar a los 100.000 años-luz, o sea 960 mil billones de kilómetros.

jan unas de otras en un constante proceso de expansión que hace disminuir de manera permanente la densidad del universo. Estamos ahora en esta última etapa o, para decirlo con palabras de Lemaître, de los fuegos de artificio con que comenzó el univer-

so solo quedan ahora unas pocas cenizas calientes que son nuestras galaxias.

Cosmologías del estado estable

En completo contraste con los modelos evolutivos de la cosmología relativista (de los que el de Lemaître solo es uno de varios) se encuentra la teoría del estado estable. La base de esta teoría, como indica su nombre, es la hipótesis de que el universo, no solamente es uniforme en el espacio, sino también inmutable en el tiempo, cuando se lo considera en escala suficientemente grande. Parece ser el modelo más simple del universo y aquél en el cual el conocimiento de la física, obtenido localmente, puede aplicarse con la máxima confianza. Pues hemos aprendido toda nuestra ciencia en una minúscula región del espacio y en un período de tiempo muy corto, cosmológicamente hablando. A menos que nuestro lugar y nuestro tiempo sean característicos de todo el universo, no podemos tener mucha confianza en la validez de nuestra ciencia en otras regiones del universo y en otros tiempos. Claro está que esta hipótesis de la uniformidad en el espacio y en el tiempo no significa que el universo deba conformarse a ella. Solo significa que éste parece ser un buen modelo para investigar, pues, debido a la confianza con la que podemos aplicar nuestro conocimiento a todos los tipos de problemas que pre-

senta, es posible hacer más y mejores predicciones por las cuales la teoría pueda ser sometida a prueba.

El rasgo más notable de esta teoría es el proceso de creación continua. Debido a la expansión del universo, la densidad media de la materia disminuiría constantemente, lo que contradice la suposición de que el sistema no cambia. Por consiguiente, si deseamos permanecer fieles a nuestras hipótesis, no tenemos más remedio que postular una creación continua de materia en todas partes y en todos los tiempos, es decir, la aparición a partir de la nada de átomos de hidrógeno. La tasa de esta creación continua es muy baja, debido a la tenue distribución de la materia en el universo y a la lentitud de la expansión, medidas por patrones terrestres. En todo el volumen de la Tierra, sería equivalente a una masa como la de una partícula de polvo cada millón de años, aproximadamente. Es obvio que esta proporción está muy por debajo de todo lo que es posible medir directamente y no contradice los experimentos o las experiencias sobre las que se basa la conocida ley de la conservación de la materia. En cambio, es indudable que parece una hipótesis bastante extraña. Naturalmente, si nos alejamos mucho de nuestro medio ambiente habitual, en el cual se han formado nuestras experiencias, no debemos sorprendernos de hallar algo extraño. También los matemáticos hallan inconveniente la teoría de la creación continua, pues durante largo tiempo han trabajado con una ley de la conservación de la materia que es matemáticamente absoluta. Pero la conveniencia matemática no es buena guía para el progreso científico.

Cómo actúa la creación continua

¿Qué aspecto tiene, pues, este universo del estado estable? Aunque no cambia en gran escala, no es inmutable en detalle. Cada galaxia individual envejece debido a la manera en que sus recursos de hidrógeno se agotan al convertirse en helio, y por otras razones. Pero el envejecimiento de los miembros individuales del universo no implica que el universo como un todo envejezca. En una población humana, cada individuo nace, crece, envejece y muere, pero si consideramos la población de una manera estadística, no parece producirse ningún cambio, al menos si la población es estacionaria, que es el caso que está en consideración. Luego, el número de niños de diez años de edad será el mismo en un instante que en cualquier otro, aunque, por supuesto, los individuos serán distintos. De manera similar, la fracción de la población de más de sesenta y cinco años será la misma en cualquier instante, aunque, nuevamente, estará compuesta de diferentes individuos. Por consiguiente, una mirada de conjunto al sistema ofrecerá siempre el mismo aspecto. El universo de la teoría del estado estable es similar. Las galaxias individuales envejecen y se apartan unas de otras debido a la expansión, pero, en los espacios cada vez mayores que hay entre ellas, la materia creada recientemente se condensa para cons-



FIG. 7. Para visualizar la teoría del estado estable, imaginemos una época en que una determinada región del espacio contenía siete galaxias que se alejaban unas de otras.



FIG. 8. Si no se formara ninguna nueva galaxia, la región del espacio de la figura 7 tendría este aspecto.

El alejamiento de las galaxias originales dejaría "despoblada" la región, a medida que el universo se expandiera.



FIG. 9. Pero si la explicación ofrecida por la teoría del estado estable fuera la correcta, se formarían nuevas galaxias. Éstas remplazarían entonces a las más antiguas, que se han alejado. Por consiguiente, la misma región del espacio volvería a contener siete galaxias, como en la figura 7.

tituir nuevas galaxias, de modo que la distancia media permanece siempre la misma. La condensación es el proceso de nacimiento de una galaxia; la expansión hacia regiones difíciles de ver es el proceso de la muerte; entre ambos procesos, se sitúa el del crecimiento. Si bien cada galaxia envejece de este modo, una visión de conjunto del sistema presentará siempre el mismo cuadro, como en el caso de la población humana.

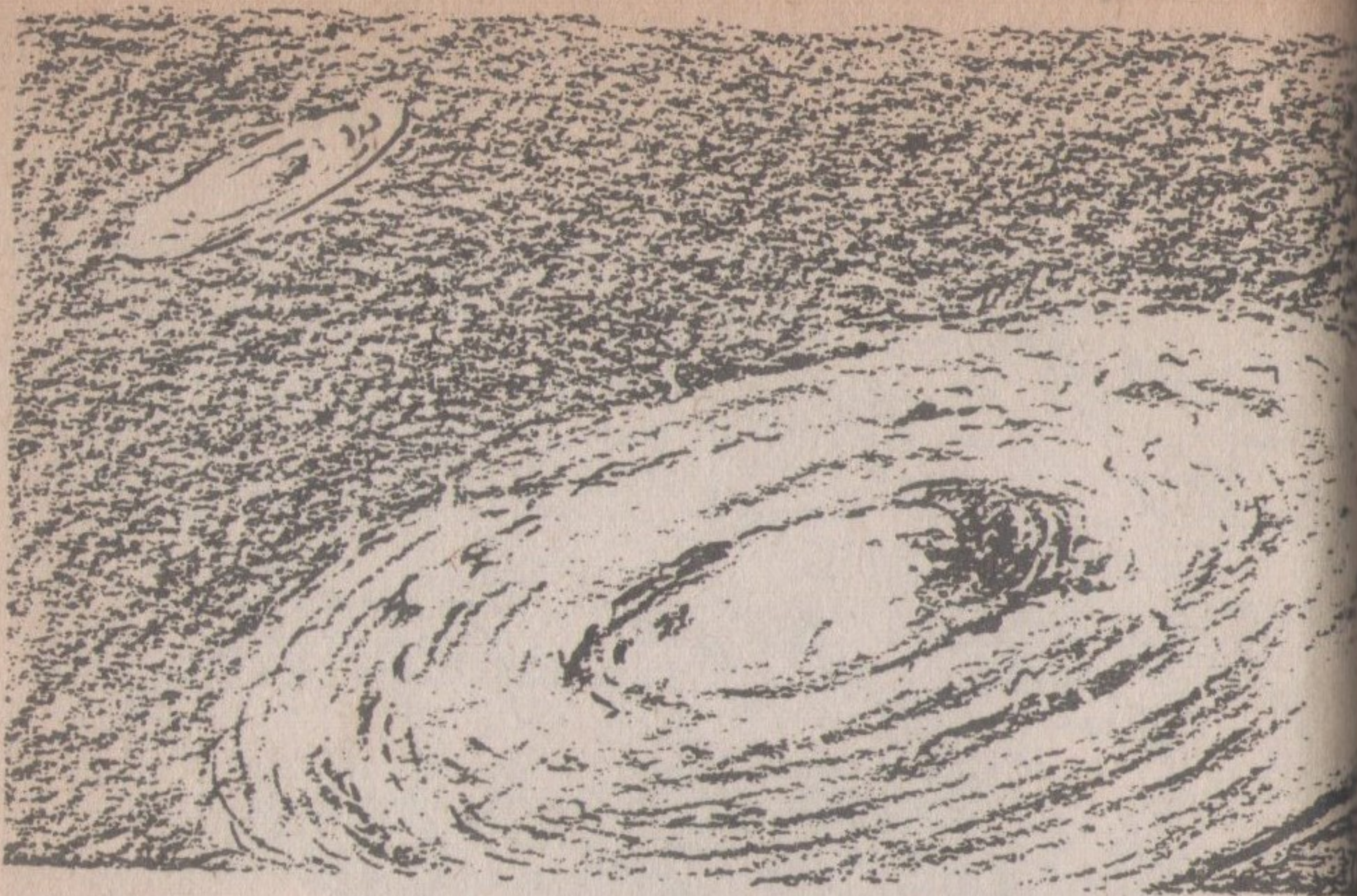


Fig. 10. Si la teoría del estado estable es válida, en la progresión indicada en las figuras 7 a 9 se produce una continua desaparición en el espacio de galaxias antiguas; en su lugar, aparecerán nuevas galaxias, condensadas a partir de la materia creada recientemente.

Con esto completamos nuestra descripción de ambas teorías. Los ensayos que se puedan hacer, las observaciones por las cuales una u otra de esas teorías, o quizás ambas, puedan ser refutadas, constituirán el tema del próximo capítulo.

Capítulo 4

Pruebas en cosmología

En el capítulo anterior llamamos la atención sobre la diferencia entre los modelos evolutivos, en los que el universo en su totalidad sufre cambios en el transcurso del tiempo, y el modelo del estado estable, en el que el universo siempre presenta el mismo aspecto en todos los tiempos, cuando se los considera en una escala suficientemente grande. El propósito de estas teorías es sugerir observaciones por medio de las cuales puedan ser puestas a prueba sus predicciones. Como es de suponer, no todas las afirmaciones de detalle de una teoría pueden ser sometidas a ensayo. Por ejemplo, la velocidad enormemente baja de la creación continua que requiere la teoría del estado estable, no es directamente accesible a la prueba. Pero si las consecuencias de la teoría pueden ser sometidas a ensayo y se encuentra que ellas concuerdan con la observación, nos sentiremos mucho más inclinados a aceptar la idea de la creación continua sobre esta evidencia indirecta.

Afortunadamente, en cosmología hay un considerable número de pruebas que pueden hacerse y

que nos permitirían optar entre las teorías más importantes de la actualidad. Esos ensayos pueden hacerse con los equipos de observación existentes, aunque quizá se hallen en el límite de lo que es posible conseguir con esos equipos. Describiremos ahora en detalle algunas de esas pruebas.

Edad de las galaxias

Si contemplamos regiones distantes del universo, no las veremos como son actualmente, sino como eran cuando la luz que ahora recibimos de ellas comenzó su viaje por el espacio. Aunque la velocidad de la luz es grande, las distancias son tan enormes, que la luz necesita mucho tiempo para llegar hasta aquí. En el caso de algunos objetos celestes que podemos ver, la luz, probablemente, ha tardado miles de millones de años en llegar hasta nosotros. Por consiguiente, vemos esos objetos como eran hace varios miles de millones de años, no como son ahora. ¿En qué medida es importante esto? Se recordará que, según la teoría de Lemaître, todas las galaxias se formaron más o menos al mismo tiempo y que actualmente no hay galaxias en formación. Por eso, sobre la base de esta teoría, todas las galaxias cumplen años por la misma época, aproximadamente. Si contemplamos las más distantes, las veremos como eran cuando emitieron la luz que ahora recibimos de ellas. En cambio, a las galaxias cercanas las vemos más o menos como son actualmente.

Podemos compararlas con mellizos nacidos en Inglaterra, pero separados a muy temprana edad, uno de los cuales permaneciera en Inglaterra y el otro fuera llevado a Australia. Si se envían con frecuencia, por barco, fotografías del mellizo australiano a la casa del otro, el primero siempre parecerá varias semanas más joven que el de Inglaterra, debido

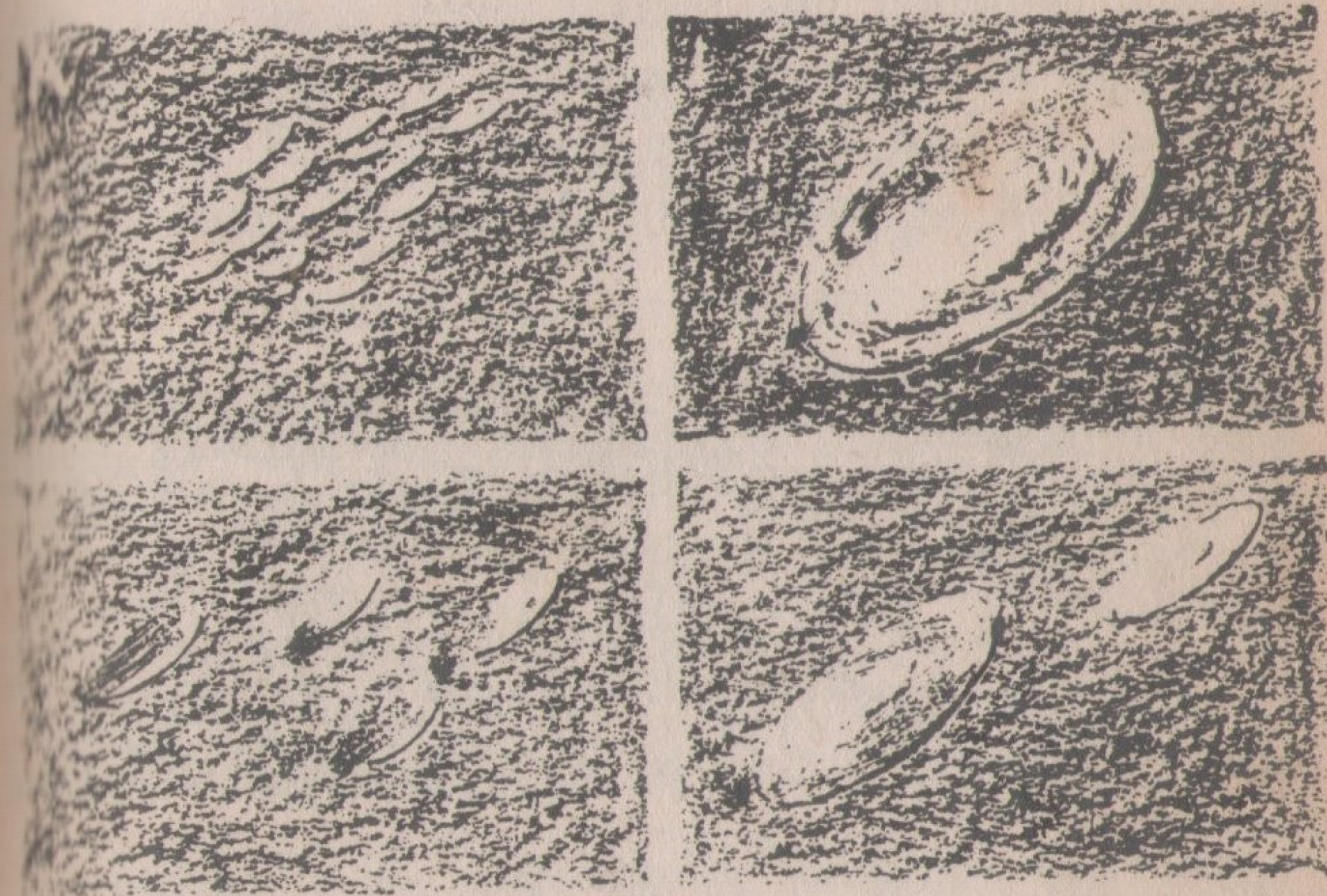


Fig. 11. Comparación de la teoría de Lemaître (A y B) con la teoría del estado estable (1 y 2). En la teoría de Lemaître, todas las galaxias nacieron juntas (A), hace unos diez mil millones de años. Desde entonces, han ido creciendo y alejándose, de modo que en la actualidad hay galaxias de avanzada edad (B) entre las cuales se abren grandes distancias. En la teoría del estado estable, se forman constantemente nuevas galaxias (1). A medida que las viejas galaxias se alejan cada vez más unas de otras, se forman las nuevas (2) en los espacios que las primeras dejan libres.

al retraso en el correo. De manera análoga, se produce un retardo en el correo del universo, correo que está representado por la luz que llega a nosotros de esas regiones distantes. De acuerdo con esto, basados en la teoría de Lemaître, las galaxias lejanas parecerán más jóvenes que las próximas a nosotros. Desgraciadamente, no sabemos qué aspecto debe presentar una galaxia joven, comparada con una vieja. Nuestras teorías sobre la evolución de las galaxias no han ido muy lejos. Pero es razonable esperar que se manifieste de alguna manera una diferencia.

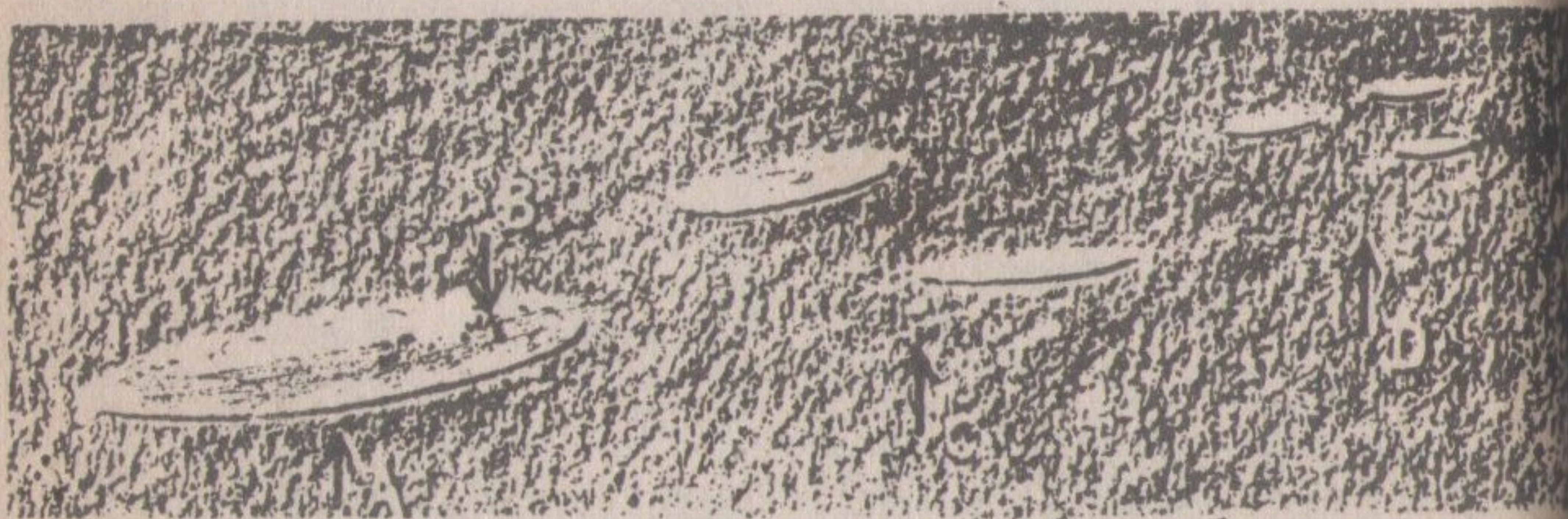


FIG. 12. Si dirigimos nuestra vista por el espacio a grandes lejanías, podemos ver las galaxias tales como eran hace miles de millones de años. Por ejemplo, nuestra propia galaxia se halla representada en A, con el Sol en B. En C están las galaxias más próximas, cuya luz tarda diez millones de años en llegar hasta nosotros. Pero en la derecha (D), están representadas las galaxias más distantes, cuya luz tarda miles de millones de años en llegar hasta nosotros. En realidad, las vemos como eran hace muchísimo tiempo.

Las galaxias jóvenes pueden ser más o menos sociables que las viejas; es decir, pueden tener mayor o menor tendencia a formar conglomerados. Pueden tener formas o colores diferentes. Y hay muchas otras características que pueden ser diferentes en una galaxia joven y en una vieja. Luego, si se mira al espacio y se comparan los rasgos de las galaxias distantes con los de las galaxias cercanas, toda diferencia visible se atribuiría al hecho que vemos las galaxias distantes en una etapa de sus vidas anterior a la de las galaxias cercanas. En el modelo derivado de la teoría del estado estable, la situación es muy distinta, pues en este modelo el universo presenta siempre el mismo aspecto. Siempre nacen nuevas galaxias. En las regiones distantes, la edad media de las galaxias debe ser la misma que en las regiones cercanas y, por consiguiente, ambos tipos de regiones debe presentar el mismo aspecto. Continuando con nuestra analogía de los mellizos, si el amigo australiano envía una fotografía de un conjunto de niños australianos, éstos no tendrán un aspecto más joven que los de un conjunto similar de niños ingleses, a pesar del retardo debido al correo. En el conjunto australiano, como en el inglés, habrá niños de todas las edades. De manera similar, si la teoría del estado estable es correcta, ninguno de los rasgos medios de las galaxias debe cambiar con la distancia. Tenemos así la primera prueba a que pueden ser sometidas ambas teorías: ver si alguno de los rasgos de las galaxias varía con la distancia. Si tal variación existe, este hecho estaría en flagrante contradicción con la teoría del estado estable y la invalidaría. Pero, si no hay tal variación, no podemos

estar seguros de que las teorías evolutivas han sido refutadas, pues bien puede ocurrir que no podamos ver bastante lejos como para observar tal variación. Sin embargo, la ausencia de variación hasta distancias realmente grandes nos haría sospechar de las teorías evolutivas.

Evolución de las galaxias

Hay otra prueba que concierne al número de galaxias de brillo mayor que un cierto brillo determinado. Medir la distancia de las galaxias individuales es una tarea sumamente difícil y casi imposible para el astrónomo. Pero éste puede hacer estimaciones de sus distancias observando su brillo aparente. Cuanto más tenue es una galaxia, tanto mayor sospecha aquel que es su distancia. Según el modelo del universo evolutivo, cuando contemplamos regiones distantes y las vemos como eran hace mucho tiempo, debemos ver las galaxias que hay en ellas mucho más próximas unas de otras de lo que están ahora, debido a la expansión del universo, que ha continuado desde que la luz fue emitida. Según la teoría del estado estable, la densidad de galaxias y las distancias medias entre ellas eran entonces las mismas que ahora, a pesar de la expansión, simplemente porque muchas de las galaxias existentes en la actualidad, no habían nacido entonces. Por lo tanto, debe haber muchas más galaxias tenues (o sea, distantes) según las teorías evoluti-

vas que según la teoría del estado estable. Nuevamente tenemos aquí la posibilidad de someter a prueba ambas teorías. Es muy probable que sea más factible realizar estas observaciones con un radiotelescopio que con un telescopio óptico.

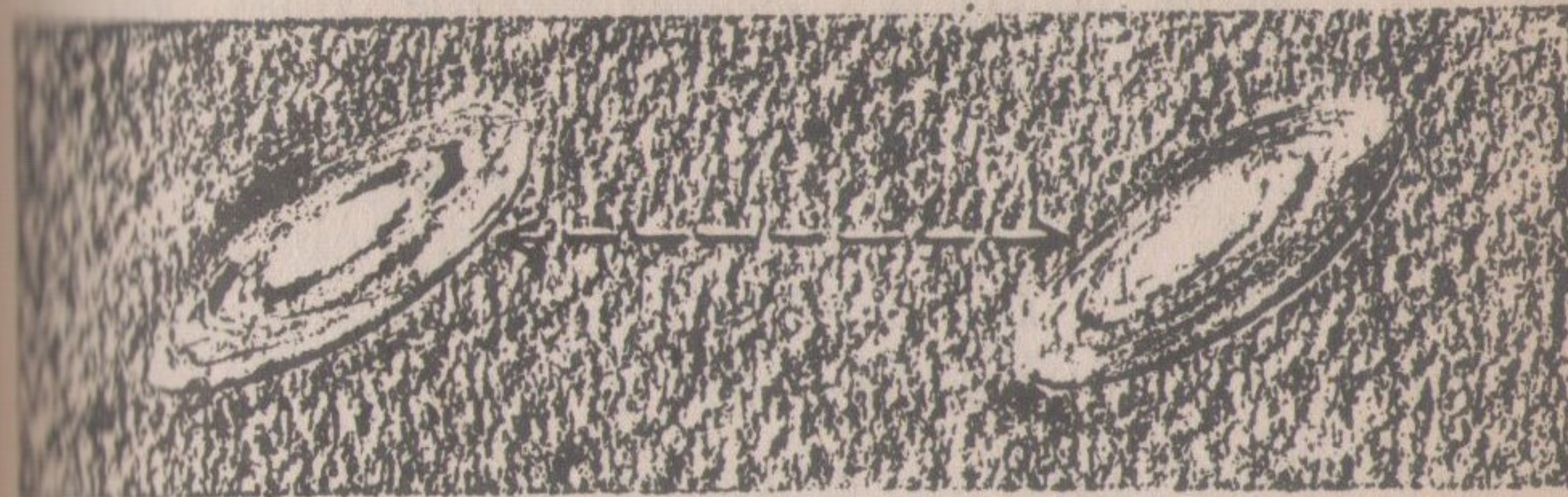


FIG. 13. En la actualidad, las galaxias tienen un determinado tamaño medio (unos 80.000 años-luz de diámetro) y están separadas por una determinada distancia media (alrededor de un millón y medio de años-luz.)

Hay otras observaciones de prueba que se relacionan con la formación de las galaxias. Según la teoría del estado estable. deben estar formándose constantemente nuevas galaxias en el espacio que hay entre las galaxias ya existentes, de modo de mantener la densidad media de galaxias a pesar de la expansión del universo. Estamos interesados, pues, en la formación de galaxias en presencia de otras existentes. Por otra parte, según las teorías evolutivas hubo un período en el que no había galaxias. Surge entonces la cuestión de la formación de la primera de estas galaxias. Ambos problemas se plantean al investigador teórico. Éste debe tratar de discernir

en qué condiciones pueden formarse galaxias nuevas. Si ocurriera que las galaxias solo pueden formarse en presencia de otras galaxias, volveríamos a la vieja cuestión de saber qué fue primero, el huevo o la gallina. Pero esta cuestión no asusta a los defensores de la teoría del estado estable, pues según esta teoría el universo ha existido durante un tiempo infinito y nunca ha cambiado en gran escala; por consiguiente, no nos preocupa la referencia a la generación previa. En cambio, las teorías evolutivas dependen completamente de la posibilidad de la formación de galaxias antes de que haya ninguna otra para comenzar. Actualmente, se está trabajando sobre ambos problemas y tenemos esperanzas de que los teóricos lograrán ilustrarnos acerca de ellos antes de que pase mucho tiempo.

Origen de los elementos

También se plantea el problema del origen de los elementos. Desde el punto de vista del físico nuclear, el hidrógeno es, con mucho, el más simple de todos los elementos. También se da el hecho de que en gran escala, es el más común de todos los elementos. Durante mucho tiempo, se sospechó que el hidrógeno es, en realidad, el origen de toda la materia y que los otros elementos se han construido de alguna manera a partir del hidrógeno. En lo que respecta al más simple de los elementos, después del hidrógeno, o sea el helio, no se presenta ninguna

dificultad, pues en las estrellas el hidrógeno se transforma en helio constantemente. Pero, ¿de dónde provienen todos los otros elementos? Durante largo tiempo pareció que ninguna de las estrellas que conocemos es bastante caliente, aun en su centro, como para haber sido la fuente de alguno de los elementos más complicados. Se cuenta que cuando los físicos nucleares dijeron a Sir Arthur S. Eddington, el famoso astrónomo y cosmólogo, que las temperaturas calculadas por él para los centros de las estrellas eran insuficientes para construir elementos más complicados que el helio, contestó: "Entonces, desearía que los físicos nucleares vayan a un lugar mucho más caliente."

La búsqueda de este "lugar más caliente" continuó durante algún tiempo. Con el modelo de Lemaître, que postula un estado muy caliente y denso en los comienzos, muchos creyeron que se había encontrado ese "lugar mucho más caliente"; pero ésta es una situación que la teoría del estado estable no puede aceptar. Según esta teoría, el universo es muy similar en todos los tiempos. Si no existen *ahora* fábricas en las que puedan elaborarse elementos pesados, entonces *nunca* hubo tales fábricas. Por eso, se hicieron intentos por hallar esas fábricas en el universo existente. Y, en realidad, se las encontró. Al parecer, son de dos tipos diferentes, ambos importantes. Uno es el centro de las estrellas inmensamente grandes, llamadas gigantes rojas. Estas estrellas son verdaderamente inmensas, pues tienen radios que son 100 veces mayores que el radio del

Sol, o más grandes aún. De acuerdo con las ideas modernas, en los centros de esas estrellas se presentan condiciones adecuadas para la elaboración de muchos elementos pesados y la teoría también afirma que muchas de esas estrellas llegan a explotar con lo que dispersan por el espacio los elementos recientemente formados. No solo son fábricas en las que se elaboran esos elementos, sino que también constituyen medios de su distribución al por menor, pues los ponen a disposición de todo el universo.

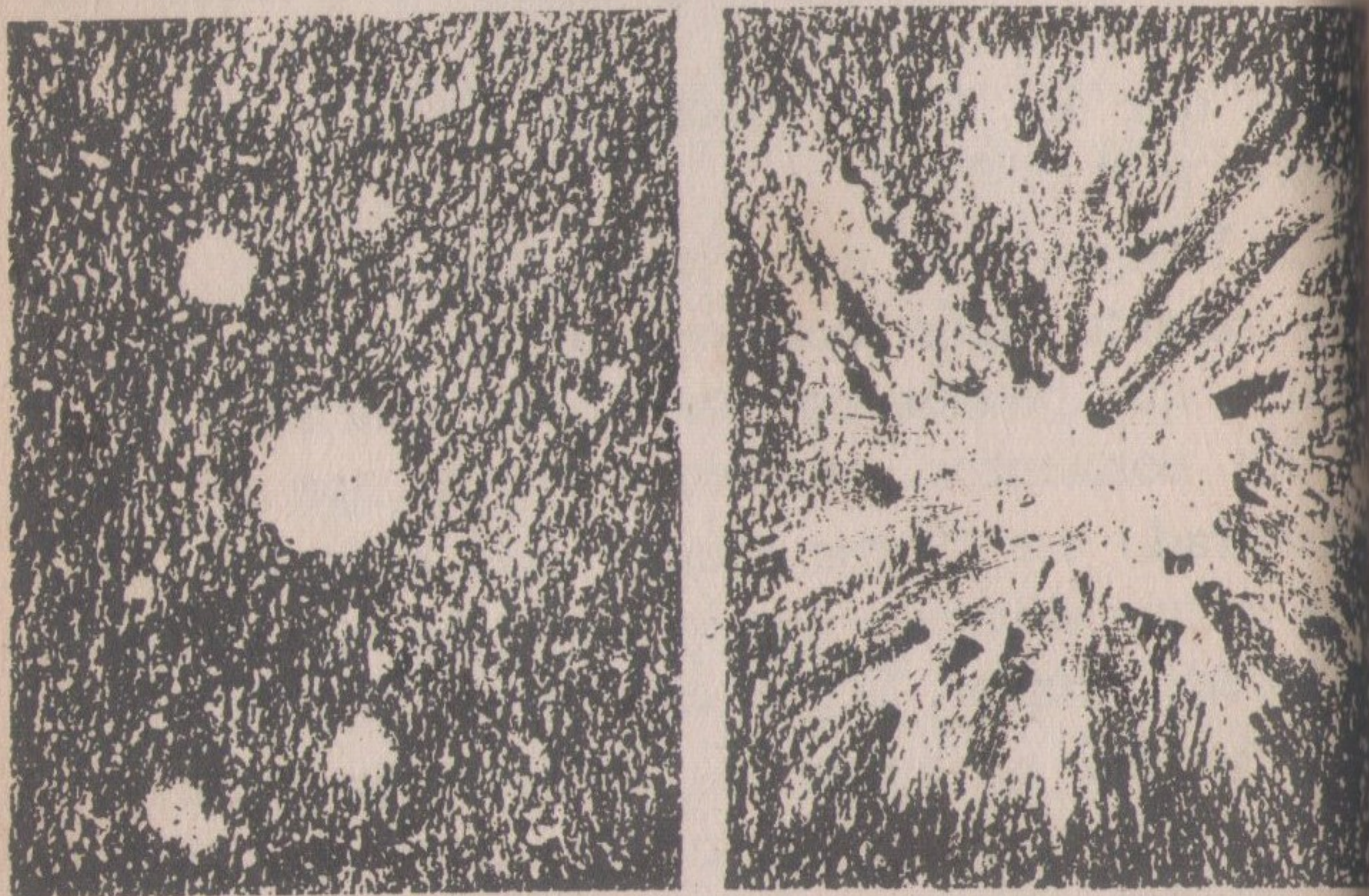


Fig. 14. Ocasionalmente, podemos ver explosiones en el espacio, en las cuales una estrella emite un fulgor cuyo brillo es miles de millones de veces mayor que el del Sol. Algunos cálculos nos permiten deducir las temperaturas de estas estrellas explosivas. Hay en ellas suficiente calor como para combinar elementos livianos y producir, mediante este proceso, los elementos pesados.

Otras fuentes de elementos pesados son las extraordinarias estrellas llamadas supernovas. Son estrellas que adquieren repentinamente brillos extraordinarios, miles de millones de veces mayores que el brillo del Sol, y luego se van apagando gradualmente. Se las observa a menudo en otras galaxias, aunque en cada una de ellas solo aparezcan quizás a intervalos de cientos de años. Se sabe que en nuestra propia galaxia han aparecido algunas, en tiempos históricos, y se las ha descrito. La más famosa de ellas es la célebre supernova china del año 1054. Los chinos nos han dejado una descripción muy completa del magnífico espectáculo que presenta una estrella así, tan brillante que es visible en pleno día. Luego, se fue apagando gradualmente y en la actualidad, 900 años más tarde, podemos ver con un telescopio los restos de esa explosión, que forman una nube de gas difusa llamada la Nebulosa del Cangrejo. Estas supernovas también son fábricas y canales de distribución de elementos pesados, que se forman en el curso de este gigantesco estallido y luego se diseminan por el espacio. Esas fuentes, que han sido investigadas exhaustivamente, nos suministran buenas razones para creer que podemos explicar la existencia de todos los elementos químicos mediante tipos de estrellas que pueden realmente ser observadas en la actualidad. Con esto, se ha esfumado mucho del atractivo que tenía el estado inicial muy denso y caliente del modelo de Lemaître. Inclusive, los físicos afirman ahora que, de todos

modos, no pueden haberse creado esos elementos en ese estado inicial.

Hay también muchas otras pruebas que son demasiado técnicas para describirlas aquí. Pero ya hemos dicho lo suficiente como para demostrar que nuestras teorías no son meras especulaciones ociosas, sino que apuntan al propósito de hacer predicciones que puedan ser refutadas, o al menos criticadas, por los observadores.

Capítulo 5

Estrellas

Debe de haber pocos lugares en todo el universo tan inaccesibles para nosotros como el centro de las estrellas. Ni el más imaginativo viajero del espacio puede concebir un viaje al centro de una estrella y no parece haber ninguna probabilidad de poder recibir alguna información directa de ese lugar. Sin embargo, la teoría de lo que ocurre en el interior de una estrella se halla particularmente bien elaborada y tenemos mucha confianza en ella. ¿Cómo se ha llegado a esto? El propósito de la teoría de la constitución estelar, como el de toda otra teoría científica, es relacionar los diferentes datos de información de que se dispone. La información que hemos obtenido sobre las estrellas se refiere necesariamente a las partes exteriores de ellas. Sin embargo, ocurre que disponemos de bastante información acerca de las partes exteriores de las estrellas como para permitirnos hacer confiadamente afirmaciones acerca de sus interiores. ¿Cuáles son, pues, los rasgos observables de las partes externas

de las estrellas que tienen importancia para el estudio de la constitución estelar?

El primer dato que se tiene de una estrella es que brilla. Es posible medir la intensidad de la luz que recibimos de una estrella, intensidad que recibe el nombre de luminosidad aparente de la estrella.

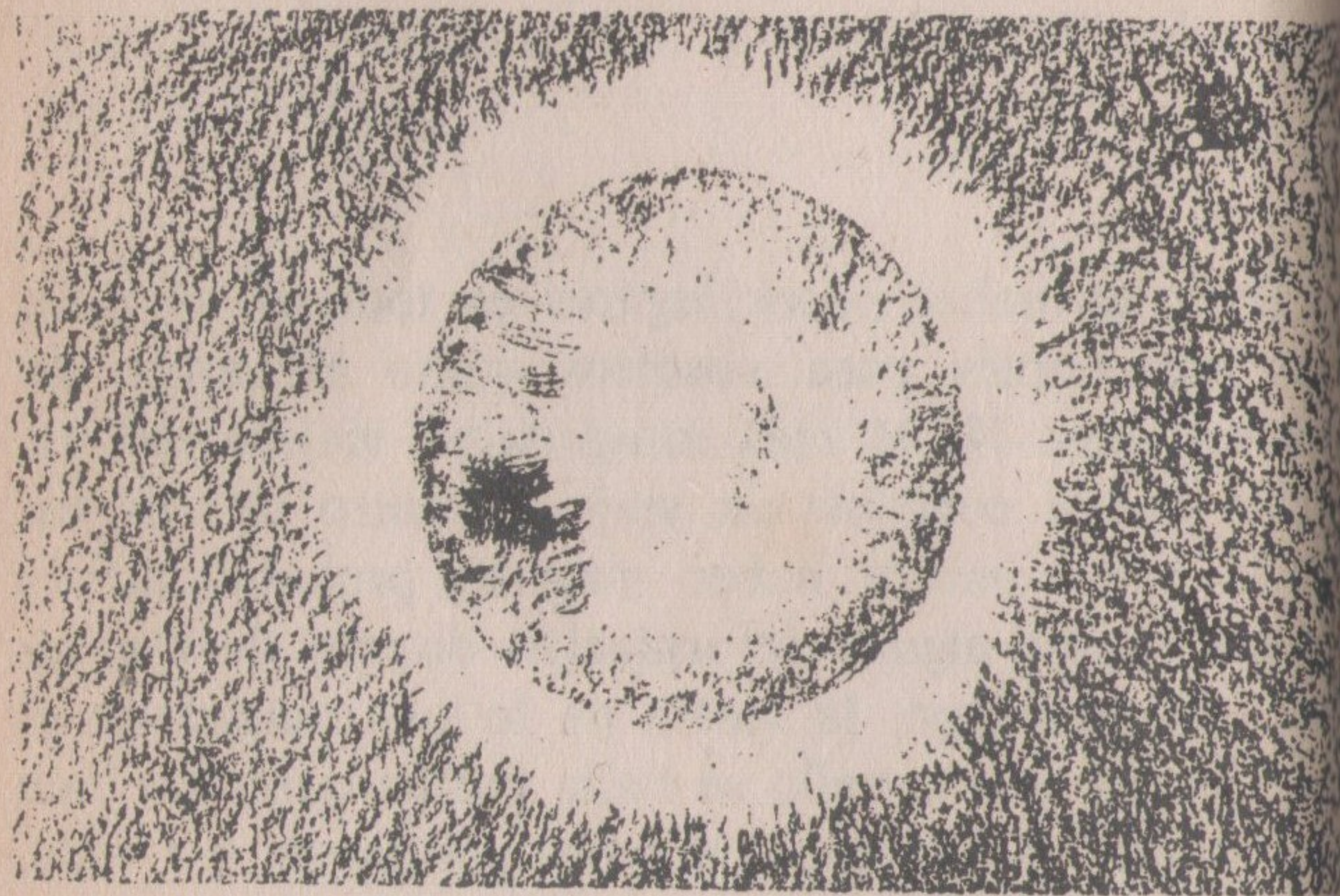


FIG. 15. Como es natural, la estrella de mayor interés para quien habita sobre la Tierra es el Sol, que es una gran esfera gaseosa y refulgente de 1.400.000 kilómetros de diámetro, cuyas características físicas están determinadas por la posesión de un núcleo gaseoso e ígneo que está a 13.000.000 de grados C de temperatura. Fuera del núcleo hay una zona incandescente y más allá de éste se encuentra la llameante y turbulenta superior exterior que nosotros vemos (6.000 grados C). (La Tierra, representada en escala, aproximadamente, es la pequeña mota blanca de la esquina superior derecha.)

La palabra "aparente" indica el hecho de que no es la luminosidad verdadera o intrínseca de la estrella. No es la cantidad de luz que emite la estrella, sino la cantidad que recibimos, que depende mucho, naturalmente, de la distancia que se encuentra la estrella de nosotros y de la presencia de nubes de materia oscurecedora intermedias.

Por eso, para que la medición de la luminosidad aparente de una estrella pueda servirnos para determinar su luminosidad intrínseca o absoluta (que es la única que nos da una información sobre la estrella misma), es necesario disponer de algún medio para conocer la distancia de la estrella.

Distancias de las estrellas: paralaje

¿Cómo se mide la distancia de una estrella? El método más seguro, que, desgraciadamente, solo puede aplicarse a los pocos cientos de estrellas más cercanas, es el de la llamada paralaje trigonométrica. A pesar de su nombre tan extraño, la idea es muy simple. Si estamos sentados en una habitación, a cierta distancia de la ventana, y si miramos a través de ésta y luego movemos un poco la cabeza, el marco de la ventana oscurecerá primero una parte del paisaje y luego otra. En otras palabras, debido al movimiento de nuestra cabeza, el objeto próximo —el marco de la ventana— está primero en línea recta con alguna parte del paisaje y luego con otra. Desgraciadamente, en astronomía, mover la cabeza

no basta. Todas las estrellas están demasiado lejos para que un movimiento como éste produzca algún efecto. Pero, estamos todos sobre la Tierra y, por lo tanto, nos movemos alrededor del Sol, por lo que nos desplazamos en una distancia considerable en el curso de seis meses. Dentro de seis meses, estaremos a 304 millones de kilómetros del lugar en que estamos ahora, aunque dentro de un año volveremos a estar en el mismo punto. Luego, si algunas estrellas están mucho más cerca que la mayoría de las restantes, en el curso del año la posición aparente de estas estrellas próximas cambiará respecto de las distantes. En realidad, toda estrella cercana describirá una elipse aparente sobre el fondo de las estrellas lejanas.

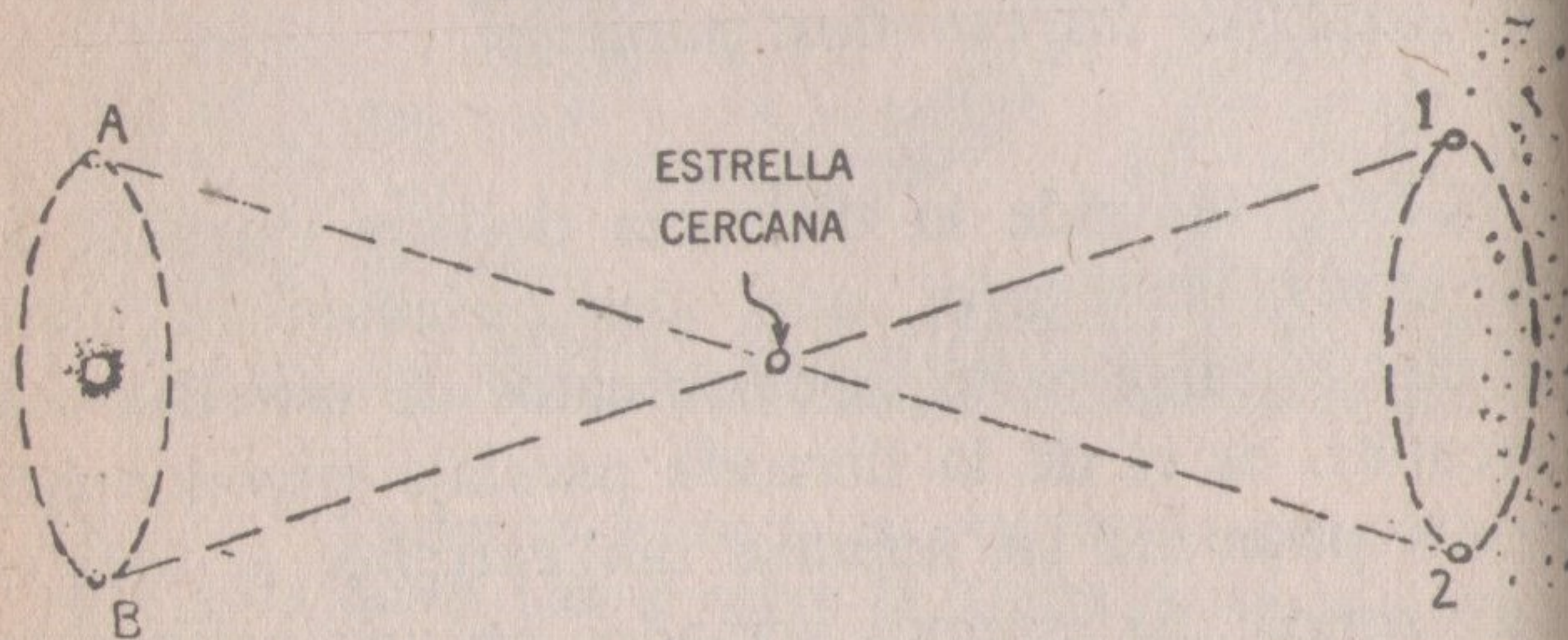


FIG. 16. La distancia se mide por el método de la paralaje. Una estrella cercana, en una época del año se halla en la visual de una determinada estrella lejana (1), y en la visual de otra distinta (2), seis meses más tarde, cuando la Tierra se ha desplazado (de A a B) alrededor del Sol. La diferencia en la dirección de los rayos de la estrella cercana determina su distancia.

En circunstancias favorables, el astrónomo puede

observar este movimiento anual aparente de una estrella cercana contra el fondo de las estrellas distantes. Cuando esto es posible, puede también medir la cantidad de este movimiento elíptico anual y, con un poco de trigonometría, podrá determinar la distancia de la estrella cercana. Desgraciadamente, las estrellas están tan lejos de nosotros que, aun para la estrella más próxima, el diámetro de esta elipse solo es de 1½ segundos de arco. Es realmente un ángulo muy pequeño; equivale aproximadamente al ángulo que subtiende una moneda de 20 centavos a una distancia de 5 kilómetros. Este ángulo minúsculo, que mide el movimiento anual aparente, es llamado la paralaje de la estrella. El refinamiento de

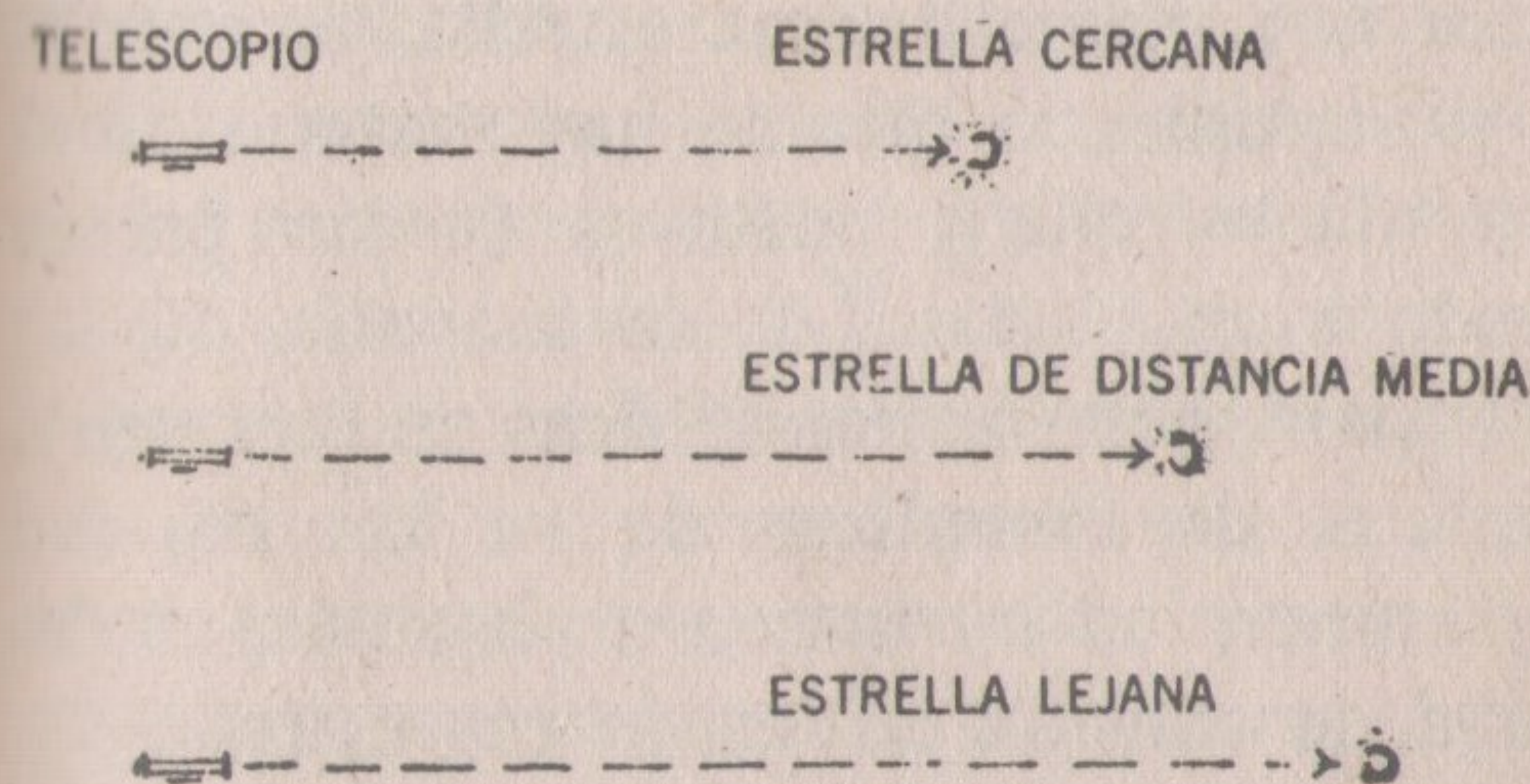




FIG. 17. Aunque estas tres estrellas emiten igual cantidad de luz, pues son de la misma luminosidad intrínseca, la cantidad de luz que recibimos de ellas disminuye a medida que aumenta su distancia. Si el astrónomo ya logró determinar su distancia, puede calcular la luminosidad de la estrella por el brillo observado; esto es, la estrella cercana será brillante y la lejana débil.

las técnicas astronómicas es actualmente tan grande que es posible medir la paralaje aun en el caso en que el ángulo subtendido por el movimiento anual aparente de una estrella sea solamente de un décimo de segundo de arco, esto es, el mismo que subtiende una moneda de 20 centavos a 64 kilómetros. Se han podido medir de este modo las distancias de varios cientos de estrellas. Digamos de paso que si el diámetro de la elipse subtiende un ángulo de un segundo de arco, la distancia a que se encuentra la estrella de nosotros es tan grande que la luz necesita seis años para hacer el recorrido desde la estrella hasta la Tierra. La estrella más próxima se encuentra a unos cuatro años-luz.

Si se conoce la paralaje de una estrella, se conoce su distancia y, suponiendo que no hay materia oscurecedora entre la estrella y nosotros (como parece ocurrir realmente en el caso de la mayoría de las estrellas cuyas paralajes trigonométricas se conocen), es posible inferir de inmediato de su luminosidad aparente su luminosidad intrínseca o absoluta, es decir, la cantidad de emisión de luz de esa estrella.

Color y temperatura

El siguiente elemento de información que podemos tener de una estrella proviene del examen de su luz en el espectroscopio. Lo que buscamos aquí es, sencillamente, el color de la estrella, pues por éste sabremos cuál es la temperatura de su superficie. Es

un hecho notable que el color del brillo de un cuerpo opaco incandescente es independiente de la composición del cuerpo; solo depende de su temperatura. Esto lo sabemos todos. Si contemplamos una buena fogata de carbón ardiente, introducimos en él un atizador y esperamos que se caliente, detrás del fuego, los pedazos de carbón, los ladrillos refractarios y el atizador incandescentes presentan todos un color tan similar, que solo por sus formas podemos distinguir unos de otros. En verdad, los colores son tan semejantes que es difícil ver dónde empieza uno de ellos y dónde termina el otro. Además, todos estamos familiarizados con el hecho de que el color del brillo depende de la temperatura. Si el calor no es muy grande, su color es de un rojo oscuro; si el fuego es más caliente, veremos un rojo brillante y hasta un color anaranjado; en los calores muy intensos se ve un color amarillo. En las fogatas domésticas por lo general no se llega a temperaturas superiores a éstas, pero en los procesos industriales o en el laboratorio sabemos que, más allá del amarillo, el calor adquiere una coloración blancuzca y, para temperaturas aún mayores, el blanco adquiere un tinte azulado. No solamente podemos relacionar el color del brillo con la temperatura de cuerpo que lo omite, de una manera que es totalmente independiente de la composición del cuerpo, sino que sabemos también que, a un color determinado del brillo —esto es, para una temperatura determinada—, le corresponden una intensidad de radiación y una emisión de calor también perfectamente determinadas. Todos

saben que un atizador que adquiere un color rojo opaco no emite tanto calor como otro que presenta un color rojo brillante o un color amarillo, y que un fuego realmente caliente y de aspecto amarillento irradia mucho más calor en una habitación que otro que solamente resplandece. El físico puede medir qué cantidad de luz y de calor sale de un cuerpo incandescente. Y encuentra, nuevamente, que la emisión por unidad de superficie es independiente de la composición del cuerpo, pero, en cambio, depende de la temperatura. De hecho, es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura. Esto significa que al duplicarse la temperatura, la tasa de emisión de calor aumenta 16 veces.

La propiedad que tienen los cuerpos de irradiar calor de su superficie también opera a temperaturas mucho menores, cuando no hay ninguna incandescencia visible. En realidad, los cuerpos irradian calor aun a las temperaturas ordinarias. Nosotros mismos —en nuestros cuerpos— perdemos buena cantidad de calor irradiándolo a nuestro alrededor en cantidad mayor de la que recibimos de él. Se calcula que, en circunstancias normales, una mitad de la pérdida del calor corporal se produce por radiación y la otra mitad pasa al aire circundante. En realidad, la radiación es uno de los principales problemas de la calefacción doméstica. La cantidad de radiación que recibimos depende de la temperatura de nuestro ambiente, esto es, de la paredes, los techos y los pisos de las habitaciones en que vivimos. Si ellos están fríos, aun cuando el aire de la habitación se encuentra a elevada temperatura (de modo que nuestra pérdida total de calor no sea excesiva), nos sentimos incómodos y decimos que la habitación está sofocante, pues es desagradable perder mucho calor por radiación y poco por el aire. Claro que si mantenemos bien caldeada una habitación todo el día, el aire gradualmente calentará las paredes, recibiremos más radiación de ellas y volveremos a sentirnos cómodos. Otra manera de lograr el *confort* es colocar algo opaco entre nosotros y los lugares fríos. Todos sabemos cuánto más cálida se siente una habitación si colocamos un cortinado en la ventana, en un día frío. Pues, entonces, la radiación de calor que llega hasta nosotros no proviene del vidrio de la ventana, enfriado por el contacto con el aire exterior, sino de la cortina, que se ha calentado con el aire del interior de la habitación. Los tapizados colgantes so-

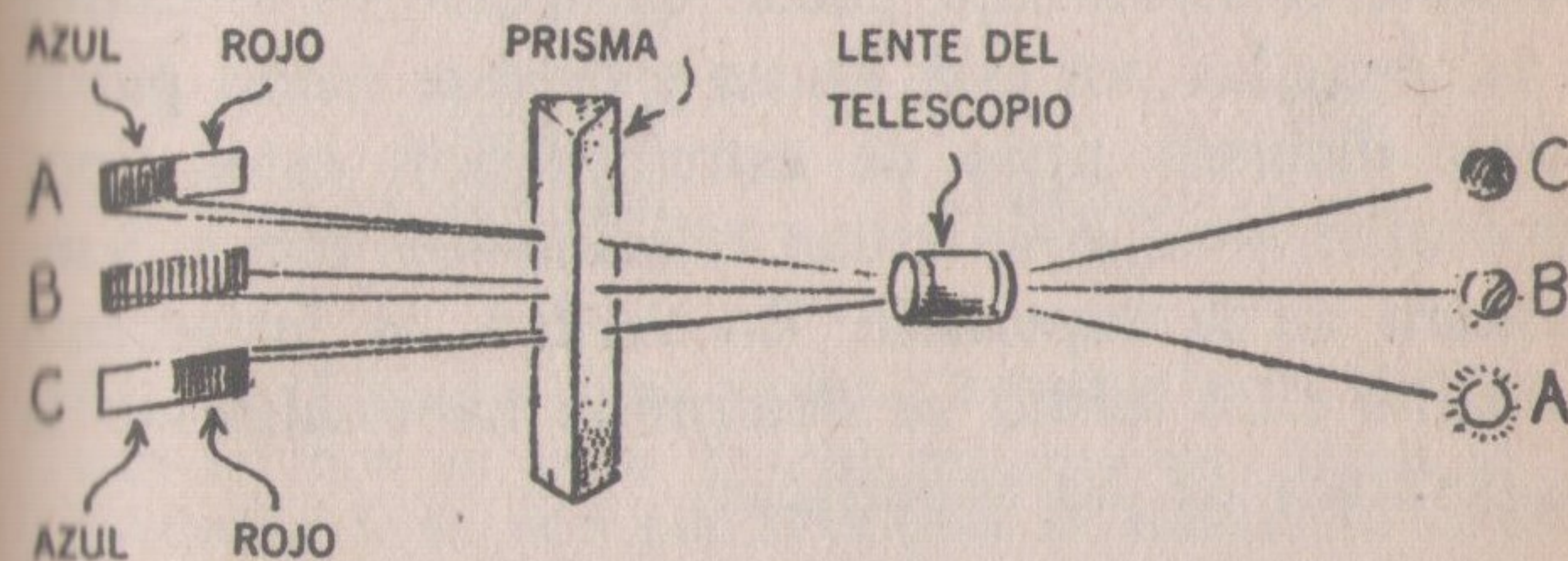


Fig. 18. Es posible determinar la temperatura de una estrella por su color. En el diagrama, la luz de la estrella A que pasa a través del prisma es principalmente azul y, por tanto, se trata de una estrella "caliente". La estrella B manifiesta un continuo cambio de color del azul al rojo y es, por consiguiente, de temperatura mediana. La estrella C es roja y "fría".

bre las paredes eran un antiguo medio de obtener condiciones más confortables en una habitación. El calentamiento de los techos y de los pisos es un medio moderno de conseguir el mismo fin y mantener el intercambio de radiación de nuestros cuerpos en un equilibrio agradable.

Volviendo ahora a las estrellas, su luz no nos llega directamente de sus superficies opacas (donde el material estelar se hace tan denso que deja de ser trasparente), sino que debe atravesar antes los gases de las atmósferas estelares que las rodean. De esta manera se producen las complicadas líneas oscuras de los espectros estelares. Si bien es indudable que estos espectros contienen una gran riqueza de información, es sumamente difícil descifrarla. No obstante, el astrónomo puede clasificar los espectros de las estrellas por esas líneas y de este modo puede definir diversos tipos de estrellas. Son estos tipos espectrales los que se hallan relacionados con la temperatura de la superficie. En verdad, es justamente mediante ellos cómo se determina habitualmente la temperatura de las superficies.

Tamaño y masa de las estrellas

Tomaremos ahora en consideración la otra característica de los materiales incandescentes: la cantidad de emisión por unidad de superficie, que, como hemos dicho, se halla totalmente determinada por la temperatura. Si se determina, de la manera descrita, la luminosidad absoluta de una estrella y la temperatura de su superficie, entonces, no solamente sabremos cuánta luz emite en conjunto la estrella, sino también cuánta luz emite por unidad de superficie, o sea, la cantidad de luz correspondiente a su temperatura. Por lo tanto, podemos hallar por división la superficie total de la estrella. Suponiendo que la estrella sea de forma esférica, podemos calcular in-

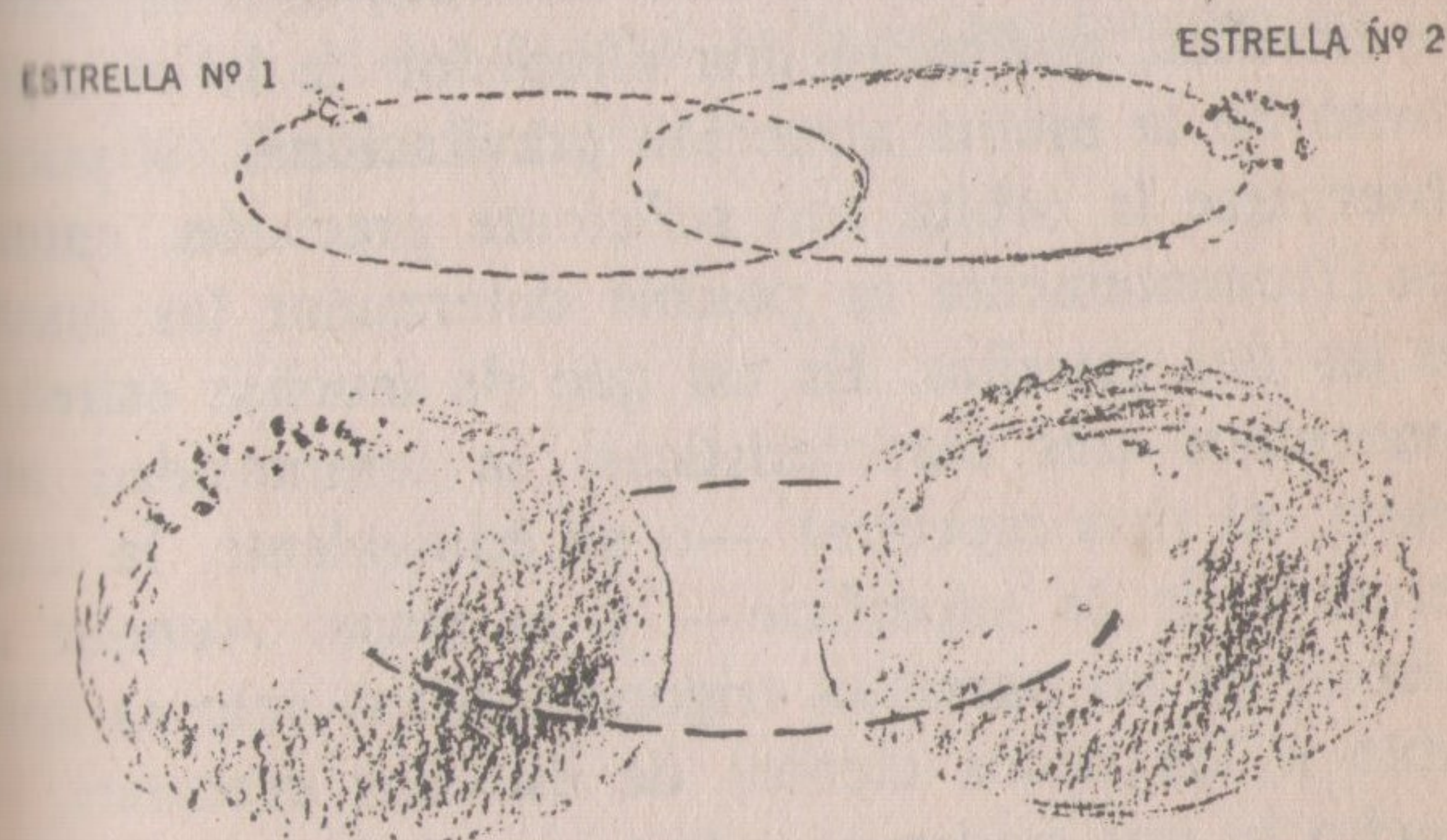


FIG. 19. Se sabe que muchas estrellas son binarias, esto es, que se trata de dos estrellas que giran una alrededor de la otra por acción de su mutua atracción gravitacional. Algunas se hallan muy alejadas entre sí y giran una alrededor de la otra en cientos de años. En cambio, otros tipos de estrellas binarias casi se tocan y giran a velocidades que pasan los 160.000 kilómetros por hora. Adquieren una forma ovalada por las fuerzas gravitacionales que ejercen una sobre la otra. En muchos casos, el astrónomo puede determinar las órbitas de estas estrellas con suficiente precisión como para poder calcular su atracción gravitacional, la cual —mediante la Ley de la gravitación de Newton— le permite apreciar la magnitud de sus masas.

mediatamente su radio. Llegamos así al notable resultado de que, si bien no podemos discernir el tamaño de las estrellas ni con los más poderosos telescopios, ha sido posible determinar sus radios de esta manera indirecta.

Una tercera característica observable, al menos en algunos casos, es la masa de las estrellas. El astrónomo aprovecha con este objeto la circunstancia de que muchas estrellas son binarias, esto es, pares de estrellas, que giran una alrededor de la otra por efecto de la mutua atracción gravitacional. Si puede observarse la órbita con suficiente precisión, entonces frecuentemente es posible determinar las masas de las dos estrellas. Es así que de muchas estrellas conocemos tres características: la luminosidad absoluta, el tipo espectral —o su equivalente, la temperatura de la superficie— y la masa. Aunque el método de las paralajes trigonométricas solo es aplicable a los pocos cientos de estrellas cercanas, es mucho lo que podemos saber acerca de las estrellas más lejanas. Pues si se descubre en las estrellas cercanas que un cierto tipo de estrella, determinado por el espectro, tiene siempre una determinada luminosidad, podemos inferir que lo mismo es válido para las estrellas más alejadas. De este modo, del espectro de una estrella podemos deducir su luminosidad absoluta. Si medimos luego su luminosidad aparente, podemos hallar la distancia a que está la estrella, aun cuando esa distancia sea mucho mayor de la que puede determinarse por mediciones parallácticas. Además, si dos estrellas están asociadas de alguna

manera (por ejemplo, si cada una describe una órbita alrededor de la otra) y podemos inferir la distancia de una de ellas de la manera descrita, entonces podemos también deducir la distancia de la otra estrella, puesto que deben estar cerca una de otra. De este modo, es mucho lo que puede saberse acerca de tipos de estrellas que no se encuentran entre los pocos cientos de estrellas cercanas accesibles al método de las paralajes trigonométricas. Es así que se conocen la luminosidad y el radio de un gran número de estrellas, y de algunas de éstas también se ha podido determinar la masa.

Capítulo 6

Qué ocurre en el interior de las estrellas

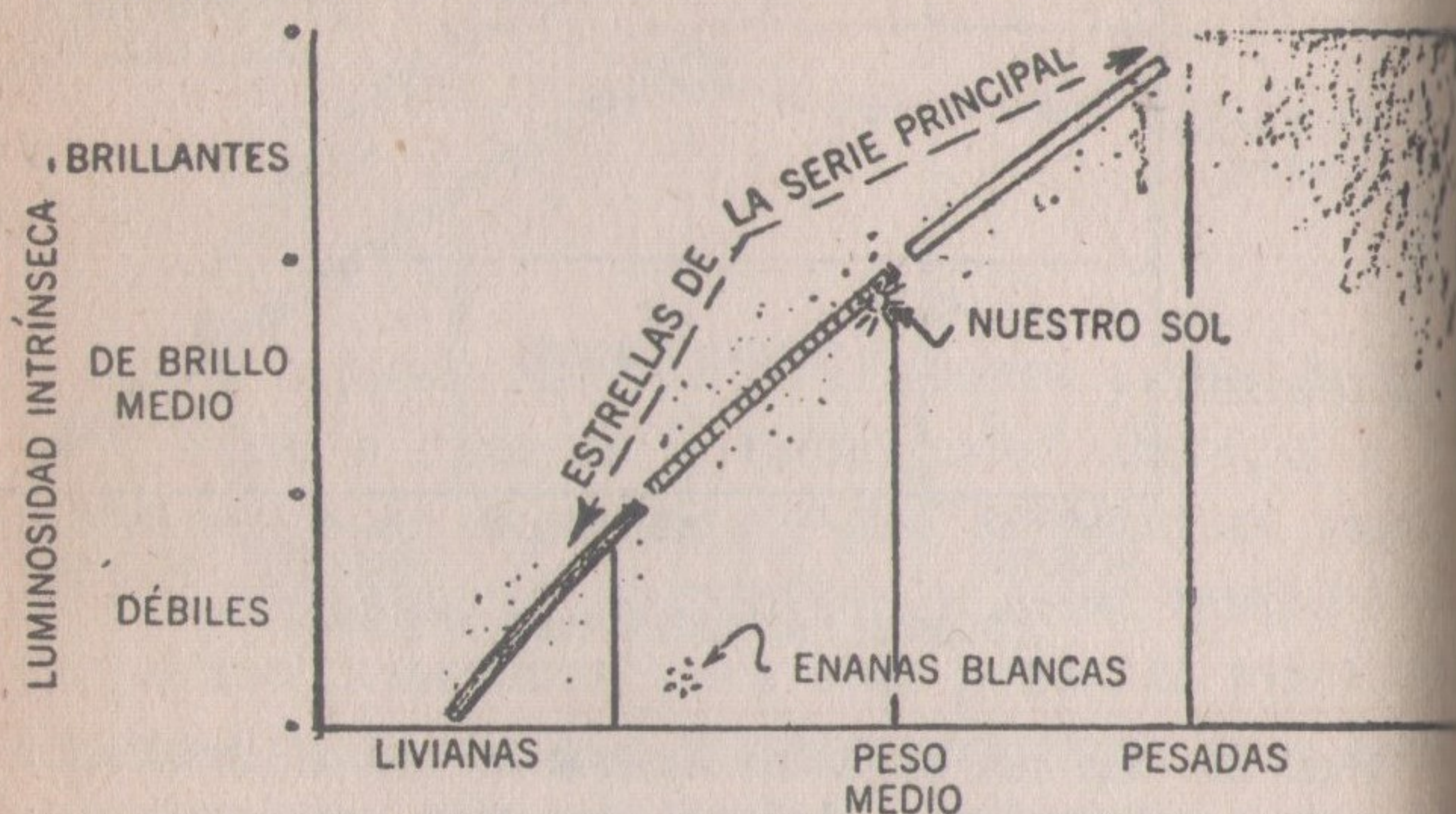
En el capítulo anterior describimos cómo es posible llegar a conocer la luminosidad absoluta y la temperatura de superficie, y por lo tanto el radio, de un gran número de estrellas, y cómo también se ha podido determinar, para unas pocas, la masa. El siguiente problema que debemos investigar es si estas características diferentes están relacionadas entre sí. Para este propósito, trazamos un diagrama, en el que representaremos la temperatura de superficie y la luminosidad absoluta de toda estrella de la que conozcamos esos datos. Tal esquema recibe el nombre de diagrama de Hertzsprung-Russell, por los dos primeros astrónomos que lo construyeron (los profesores E. Hertzsprung de Leyden y H. N. Russell de Cambridge). Este diagrama está ilustrado en la figura 20. Cada punto representa una estrella. Cuanto más fría es una estrella, tanto más a la derecha se encontrará el punto que la representa; cuanto más caliente, tanto más a la izquierda se encontrará ese punto. Por consiguiente, todas las estrellas rojas deberán aparecer a la derecha del diagrama; las estrellas amarillas no estarán a la derecha ni a la iz-



FIG. 20. En los capítulos anteriores hemos explicado cómo se las ingenia el astrónomo para conocer la luminosidad y la temperatura superficial de las estrellas, para llegar al cálculo de radios y, a veces, también de sus masas. Luego, debe establecer cómo se hallan relacionadas estas características diferentes. Para esto, elabora diagramas como el concebido por primera vez por los astrónomos Hertzsprung y Russell a fin de determinar la correlación de la temperatura superficial con la luminosidad absoluta.

quierda, sino en el medio; y las blancas, o estrellas blancoazuladas estarán a la izquierda. Cuanto mayor es la luminosidad intrínseca de una estrella, es decir, cuanto más luz emite, tanto más arriba aparecerá en el diagrama. Las estrellas más brillantes aparecen cerca del límite superior; las más débiles cerca del

límite inferior. Se observa entonces que la gran mayoría de las estrellas están en una ancha banda que va desde el extremo inferior (estrellas rojas débiles) hasta el extremo superior derecho (estrellas azules brillantes).



Gigantes Rojas, Enanas Blancas y serie principal

Esta banda de estrellas recibe el nombre de *serie principal* y nos referimos a toda estrella perteneciente a ella como a una *estrella de la serie principal*. Nuestro Sol es una estrella de la serie principal y aparece aproximadamente en el medio del diagrama. Desde un punto de la serie principal situado un poco por encima del Sol hasta la parte superior derecha del diagrama se extiende otra familia de estrellas. Son las llamadas Gigantes Rojas. Se trata de estrellas muy brillantes, ya que aparecen muy alto en el diagrama; emiten gran cantidad de calor y de luz. Sin embargo, son rojas, es decir, su temperatura superficial no es muy elevada. Por lo tanto, la cantidad de calor o de luz que emiten por unidad de superficie no es muy grande. Para producir esa cantidad de emisión, la superficie total de esas estrellas debe ser enorme. Son estrellas muy dilatadas. Algunas de ellas tienen un radio que es cien veces mayor que el del Sol, el cual a su vez tiene un radio 100 veces mayor que el de la Tierra. Finalmente, observemos el grupo de estrellas que está en la parte inferior izquierda del diagrama. Son las llamadas Enanas Blancas, en todo respecto, las opuestas de las Gigantes Rojas. En total no emiten mucha luz, pero son caliente al blanco y, por lo tanto, irradian una gran cantidad de calor y de luz por unidad de superficie. Su área total, pues, debe ser pequeña y son objetos muy diminutos comparados con otras estrellas. A menudo, su radio es apenas superior al de la Tierra. Hay también otros tipos de estrellas, más bien raras, de los que no hablaremos aquí. Sin embargo, vale la pena mencionar el hecho de que las estrellas a las que se ha sometido a una investigación completa constituyen un conjunto poco representativo, porque una estrella brillante es visible a una distancia mucho mayor que una estrella débil. Por eso, nuestra información acerca de las estrellas brillantes la hemos obtenido de una región mucho mayor que aquella de la cual deriva nuestro conocimiento de las estrellas débiles; esto hace que las brillantes se hallen representadas en mayor número.

En el otro diagrama de la figura 20 se hallan representadas las masas estelares. Nuevamente, las es-

trellas débiles se encuentran en la parte inferior del diagrama y las brillantes en la parte superior. Pero, aquí, estar a la izquierda significa que la estrella tiene una masa pequeña y estar a la derecha que la masa es grande. Este diagrama no está tan poblado como el otro porque no se conocen muchas masas estelares. Pero surge claramente de él que la mayoría de las estrellas se ubican en una banda bien definida, ya que las estrellas de masa pequeña son débiles y las de masa grande son brillantes. Es menester señalar, sin embargo, que virtualmente todas las estrellas que forman esta banda pertenecen a la serie principal. Probablemente debido a sus grandes dimensiones, las Gigantes Rojas por lo general no tienen compañeras, por lo que casi no se conoce ninguna masa de ellas. Las Enanas Blancas parecen ubicarse definidamente por debajo de la banda.

Estructura de las estrellas

¿Qué puede decirnos la teoría de la estructura estelar acerca de todos esos cuerpos y de sus características, tal como aparecen en las figuras 21 y 22? En primer término, la teoría nos indica que debemos distinguir claramente las Enanas Blancas de todas las otras estrellas. En estas últimas, la materia se comporta en toda la estrella como un gas, esto es, como un medio altamente comprensible en el que la temperatura, la densidad y la presión se encuentran relacionadas como en cualquier gas ordinario,

por ejemplo, el aire. Pero, a causa de las enormes presiones que hay en el interior de las estrellas, la densidad de la materia es muy grande comparada con la densidad de los gases que hay alrededor de nosotros. Por ejemplo, la densidad del aire no es más que un milésimo de la del agua. La densidad media del Sol, en cambio, es 1,4 veces la del agua. Parece absurdo y curioso pensar que, si colocamos el Sol en un océano bastante grande como para contenerlo y nos olvidamos de sus propiedades generadores de vapor, se hundiría. Naturalmente, la densidad de la superficie del Sol es mucho menor que en su centro, donde puede llegar a la colosal cifra de ochenta o cien veces la densidad del agua, o sea un peso ocho veces mayor que el del plomo. Es verdaderamente notable que la materia pueda hallarse tan condensada y, no obstante ello, comportarse como un gas. Esta conducta gaseosa de materia de densidades enormes se debe en cierta medida, a las grandes temperaturas a que se encuentra el centro de las estrellas, temperaturas que llegan hasta los diez millones de grados y aún más.

El hecho que el centro de las estrellas sea mucho más caliente que la superficie, hace que la energía fluya de las regiones centrales a las partes exteriores de las mismas. Es este flujo energético el que, al emerger al espacio en la superficie de la estrella, constituye la radiación de calor y de luz por la cual la vemos. Si tenemos en cuenta el hecho de que el teórico debe tener siempre presente la enorme atracción gravitacional que la estrella ejerce sobre su pro-



FIG. 21. El calor se origina en el centro ígneo (A) de una estrella y pasa hacia el exterior a través de las capas gaseosas que lo trasportan (B) para producir finalmente la radiación luminosa de su superficie (C).



FIG. 22. La superficie de una estrella siempre se encuentra en turbulenta ignición, provocada por el calor de su interior. De tanto en tanto brotan erupciones llameantes que llegan hasta miles de millas y caen nuevamente sobre la superficie cuando se enfrían.

pia materia, el problema que aquél debe resolver puede dividirse en dos partes: primera, la cuestión de la transferencia de calor de las regiones centrales a la superficie; segunda, la generación de calor en las regiones centrales. Otro de los notables descubrimientos de Eddington fue hallar que el problema puede dividirse de este modo y que de la solución del primero, solamente, puede obtenerse mucha información útil. Esto fue de gran importancia para el desarrollo del tema, pues, si bien se disponía de los medios para resolver ese problema a mediados de la década de 1920, el problema de la generación de energía requería conocimientos de física nuclear que solo tuvieron en 1938. Eddington demostró que si la composición de la estrella es homogénea, es decir, si la distribución de los elementos químicos es uniforme en toda la estrella, el flujo de energía requería que hubiera una relación entre la masa, la luminosidad y el radio, en la que éste desempeña un papel completamente subordinado, tan subordinado que es posible a menudo dejarlo a un lado. Fue de este modo que Eddington derivó su famosa relación entre la masa y la luminosidad, que se adaptaba muy bien a la curva observada. Su teoría también le permitió deducir cuál debía ser la temperatura central de las estrellas. El resultado notable que obtuvo fue que hay muy poca diferencia en la temperatura central, en una estrella de serie principal y en cualquier otra. Este resultado lo desconcertó mucho, porque suponía correctamente que la velocidad de producción de energía nuclear depende de la tempera-

tura, y las necesidades energéticas de las distintas estrellas presentan gran variación. En una frase famosa planteó el siguiente problema: ¿La materia libera energía a una temperatura tan definida como aquélla a la cual el agua libera vapor; es decir, el punto de ebullición?

Respuesta al problema de Eddington

Fue necesario avanzar mucho en física nuclear antes de que se pudiera dar solución a este problema. El primer punto notable que es necesario aclarar es por qué las estrellas liberan tan poca energía por unidad de masa. La cantidad de masa solar que se necesita, en promedio, para producir tanta luz y calor como una lamparilla eléctrica de unos 40 vatios es de 200 toneladas. Podemos compararla con la producción total de calor de un ser humano, que es de más de cien vatios, aun cuando se halle en reposo. El enorme brillo del Sol se debe exclusivamente al hecho que es muy grande. Detrás de cada pie cuadrado de superficie hay una enorme cantidad de materia, pues la distancia desde el centro hasta la superficie es de 704.000 kilómetros. La energía liberada en esta región solo puede fluir al espacio a través de la superficie. Actualmente, tenemos una clara comprensión de las reacciones nucleares que dan origen a la energía de las estrellas. Esas reacciones consisten en la trasmutación de hidrógeno en helio. A las temperaturas que imperan en el centro de las estrellas, los núcleos de los átomos de hidrógeno (protones), despojados de sus electrones por el movimiento térmico, adquieren grandes velocidades y frecuentemente chocan unos con otros. La gran mayoría de estas colisiones no son tan fuertes como para producir algún resultado discernible, pero de tanto en tanto (una de cada mil millones de millones de millones, para ser precisos) una colisión es muy fuerte y da en un lugar vital, por decirlo así. En este caso, los dos protones no se separan, sino que quedan unidos y forman un deuterón. Entonces, es

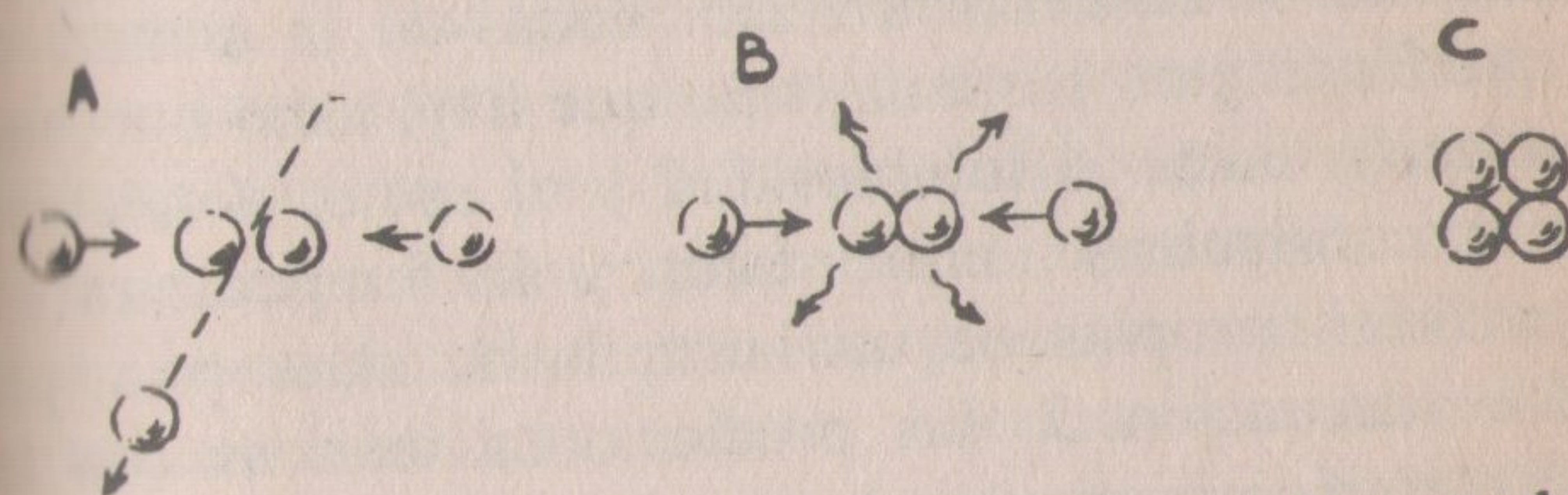


FIG. 23. La fusión termonuclear produce calor en el caso en que dos protones chocan y permanecen unidos (B), en lugar de rebotar (A). En ocasiones son cuatro los protones que se unen, lo cual genera más calor. Dos de ellos se convierten en neutrones y se forma de este modo un núcleo de helio.

relativamente fácil para el deuterón participar en otras reacciones nucleares que, eventualmente, conducen a la formación de un núcleo de helio. Éste contiene, en efecto, cuatro protones, dos de los cuales se convirtieron en neutrones. La energía que se obtiene en esta trasmutación es enorme. Un gramo de hidrógeno convertido en helio libera cerca de 200.000 kilovatios-hora. La tasa a la cual se libera

esta energía depende muy estrechamente de la te peratura, aunque no tan estrechamente como el pun de ebullición del agua.

Transformación del hidrógeno

Si usámos nuestro conocimiento de estas trasmuta ciones nucleares para la solución del problema de l transferencia, veremos que, para una estrella quími camente homogénea, no solamente la masa y la lumi nosidad se encuentran relacionadas de la manera e que Eddington sostenía, sino que hay, asimismo, un relación entre la luminosidad y el radio, y también por consiguiente, entre éstos y la temperatura su perficial, propias de una estrella de serie principal La adecuación de las predicciones teóricas con la características observadas en las estrellas es partic larmente satisfactoria si se supone, no solamente qu estas estrellas son químicamente homogéneas, sin también que están compuestas, casi en su totalidad por hidrógeno, con una mezcla muy pequeña d otros elementos. Luego, hemos obtenido un cuadr perfecto de una estrella de serie principal que co cuerda, en todos los aspectos, con los ejemplos co nocidos. Es sumamente reconfortante pensar que e modelo teórico más simple, el de la estrella gaseos homogénea, concuerda con el tipo más común d estrella, el de serie principal.

Pero tenemos que considerar ahora modelos má complicados que se adecuen a las estrellas meno

comunes, las Gigantes Rojas y las Enanas Blancas. ¿Pueden surgir estas complicaciones de una manera natural? Las reacciones nucleares que convierten el hidrógeno en helio y, de este modo, mantienen el suministro de energía de la estrella, dependen mucho de la temperatura. Cuanto más elevada es la temperatura, tanto más rápidas son las reacciones. Puesto que el centro de una estrella es mucho más caliente que cualquier otro lugar de la misma, se deduce que las reacciones solo se producirán de manera efectiva en las regiones centrales. En el curso del tiempo, el hidrógeno del centro se convierte en helio, al menos parcialmente, mientras que en las regiones exteriores de las estrellas el hidrógeno permanece inalterado. Entonces, aparece en la estrella una falta de homogeneidad química, pues las regiones centrales se hacen ricas en helio, mientras que las restantes continúan compuestas de hidrógeno casi puro. Puede demostrarse que con el tiempo, esta falta de homogeneidad origina un cambio en la estructura de la estrella y un gran aumento del radio. En otras palabras, la estrella se convierte en una Gigante Roja. Las estrellas masivas sufren tarde o temprano este desarrollo, porque queman su hidrógeno mucho más rápidamente que las otras. Por eso, este gran aumento del radio —o sea, esta transición al tipo de la Gigante Roja— se produce antes en las estrellas de mucha masa, que por esta razón son las más brillantes. Si ninguna estrella de nuestra Galaxia tiene más de ocho o diez mil millones de años, entonces las Gigantes Rojas estarían limitadas a las estrellas brillan-

tes, como ocurre en efecto. Aunque todavía queda mucho que hacer antes de que se llegue a una comprensión tan completa de las Gigantes Rojas como la que se tiene de las estrellas de serie principal, la situación actual de nuestro conocimiento es satisfactoria.

¿Qué ocurre con las Enanas Blancas? Las estrellas

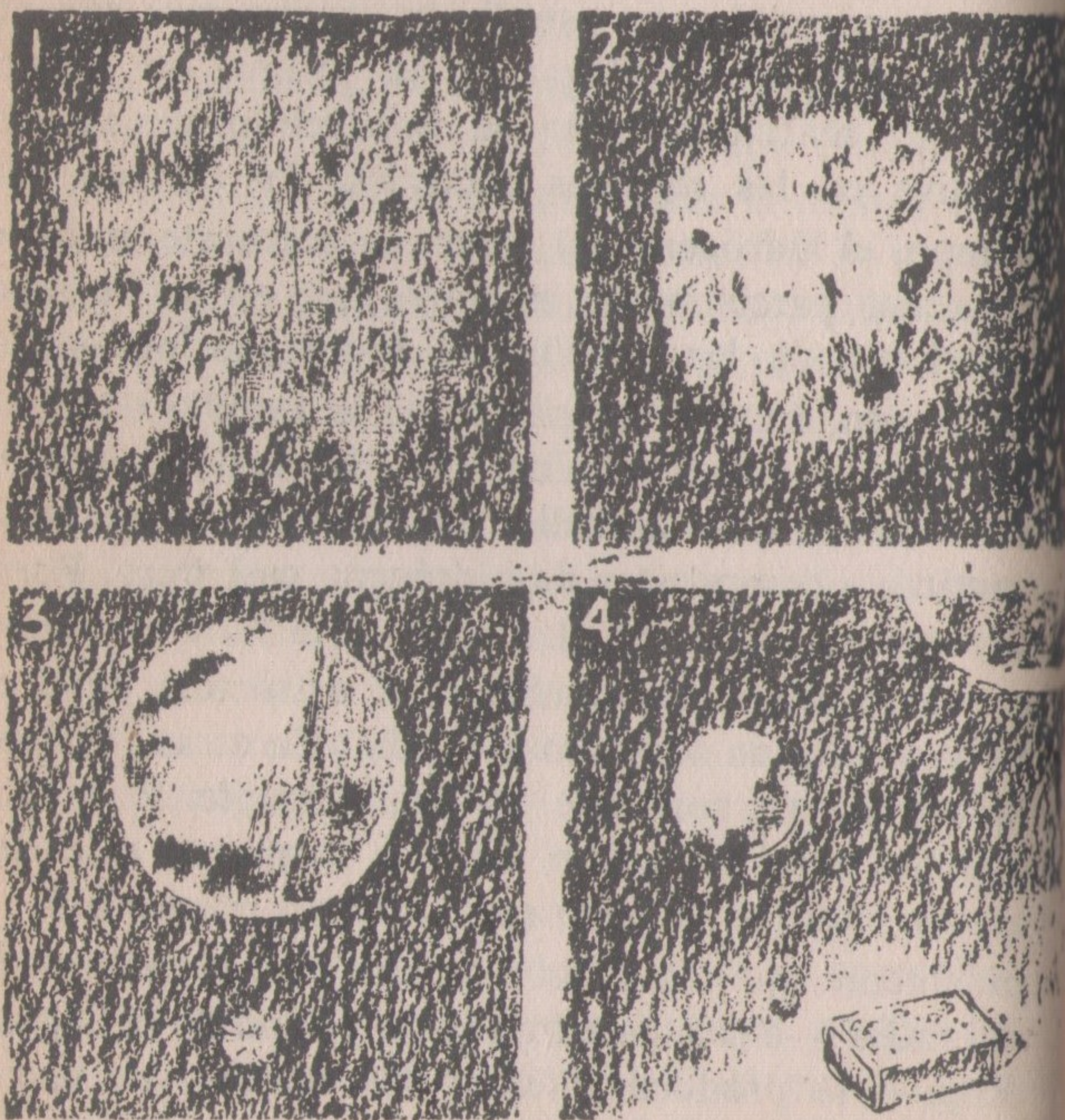


Fig. 24. Una estrella se origina (1) en una nube gaseosa informe compuesta principalmente de hidrógeno. A medida que se contrae, su centro se hace más ca-

muy brillantes, a medida que pasa el tiempo, gastan más y más su hidrógeno, hasta que eventualmente se quedan sin hidrógeno. Los desarrollos posteriores son sumamente complicados, pero es posible ver que llega un momento en que esas estrellas no pueden mantener su equilibrio térmico. Entonces, comienzan a enfriarse y a contraerse. En tanto la estrella mantenga su estado de gas puro, no hay límite para la contracción. Pero, la materia llega a ser tan densa que sus partículas constituyentes adquieren gran compactibilidad. Es muy difícil entonces comprimirlas aún más y la materia cesa de comportarse como un

liente y se convierte gradualmente en estrella. Adquiere forma esférica (2) y se contrae aún más debido a la atracción gravitacional entre todas las partículas de la estrella. La fusión del hidrógeno que se convierte en helio genera más calor en su centro. Con el tiempo, el centro llega a estar constituido principalmente por helio, rodeado por un espeso caparazón de hidrógeno (3). La estrella aumenta enormemente de tamaño, tanto que el suministro de calor solo puede mantener la superficie externa a una temperatura mucho más baja, de donde su color rojo y su nombre de Gigante Roja. El Sol, dibujado en escala, es la pequeña mancha blanca que está debajo de la Gigante Roja. Puesto que el núcleo de helio no puede producir calor, la Gigante Roja gradualmente se contrae hasta que el calor del núcleo puede mantener la superficie de la estrella empequeñecida a muy alta temperatura. Estas Enanas Blancas son muy pequeñas comparadas con el Sol, que aparece en la esquina superior derecha, y tienen una densidad enorme, tan grande que un trozo de materia de una Enana Blanca del tamaño de una caja de fósforos, pesaría más de dos toneladas.

gas. Es en esta etapa cuando la estrella presenta el aspecto de una Enana Blanca. La materia ha alcanzado la mayor compactibilidad posible. Ha adquirido la fuerza necesaria para ello, debido a su tremenda densidad. Es posible hacer ciertas predicciones en lo concerniente al estado de las Enanas Blancas, en particular que la masa solo puede ser sumamente pequeña. Todo exceso de masa debe haber sido arrojada al espacio mediante explosiones, antes de llegar a la etapa de Enana Blanca. Las predicciones de la teoría concuerdan muy bien con todas las Enanas Blancas conocidas. No debe creerse, sin embargo, que se han resuelto todos los problemas relativos a la constitución estelar. Hay varios tipos peculiares de estrellas cuya conducta es todavía misteriosa para nosotros.

Capítulo 7

Entre las estrellas

Las estrellas son los grandes faros del espacio. Podemos verlas a distancias enormes y se nos aparecen como objetos conspicuos y notables. Para un marino que pasa de noche por una costa, los faros no solamente son los objetos más útiles que puede ver, sino también los más evidentes. Sin embargo, todos sabemos que se equivocaría mucho si pensara que los faros son todo lo que hay en tierra. De manera análoga, correríamos el riesgo de sobreestimar la importancia de las estrellas si, por el hecho que son muy brillantes y fácilmente visibles, no tomáramos en cuenta cualquier otra cosa que pudiera haber en el espacio. ¿Cómo podemos llegar a saber algo acerca de las regiones situadas entre las estrellas? Ante todo, debemos comprender claramente que la mayoría de las partes del espacio son transparentes. Es indudable que si no lo fueran no podríamos ver las estrellas. Esto es un tipo de evidencia más bien negativo, toda vez que puede haber en el espacio mucho material que no produzca opacidad. En particular, puede haber grandes cantidades de gas hidrógeno en los

enormes espacios entre las estrellas y, no obstante, ser tan tenue que no intercepte la luz que pasa por él.

En algunas regiones del cielo, vemos manchas sin estrellas, rodeadas por regiones repletas de ellas. Esto ocurre sobre todo en la Vía Láctea y la única explicación plausible de este hecho es que esas manchas



FIG. 25. Aunque por su brillo las estrellas parecen poblar todo el cielo, hay en éste considerables abismos —conocidos como regiones oscuras— en los que no aparece ninguna estrella. Se trata de grandes zonas en las que vastas nubes de polvo interestelar oscurecen la visión.

oscuras son nubes de gas que interceptan el paso de la luz de las estrellas que están detrás de ellas. Una de las más conocidas de esas nubes oscuras es la que lleva el adecuado nombre de Saco de Carbón, en la Vía Láctea. Hay muchas otras regiones como ésa, en las que, obviamente, hay una nube oscura que no deja pasar la luz de las estrellas situadas detrás de las mismas. ¿Cómo podemos saber algo más acerca de esas nubes de materia? Parece razonable pensar que si el espacio es completamente trasparente

en ciertos lugares y completamente opaco en otros, debe haber también estados intermedios, esto es, regiones brumosas. ¿Cómo se revela esa niebla al astrónomo? Tratemos de examinar este problema mediante ejemplos tomados de la Tierra.

Niebla cósmica

En el crepúsculo, los rayos del Sol pasan a través de una capa mayor de la atmósfera baja, antes de llegar hasta nosotros, que cuando el Sol está alto en el cielo. Esto produce el efecto, conocido por todos, de que, en el crepúsculo, el Sol parece mucho más rojo que en su aspecto común. A menudo, da origen a un espectáculo muy hermoso. También sabemos que en una noche brumosa, con frecuencia aparece

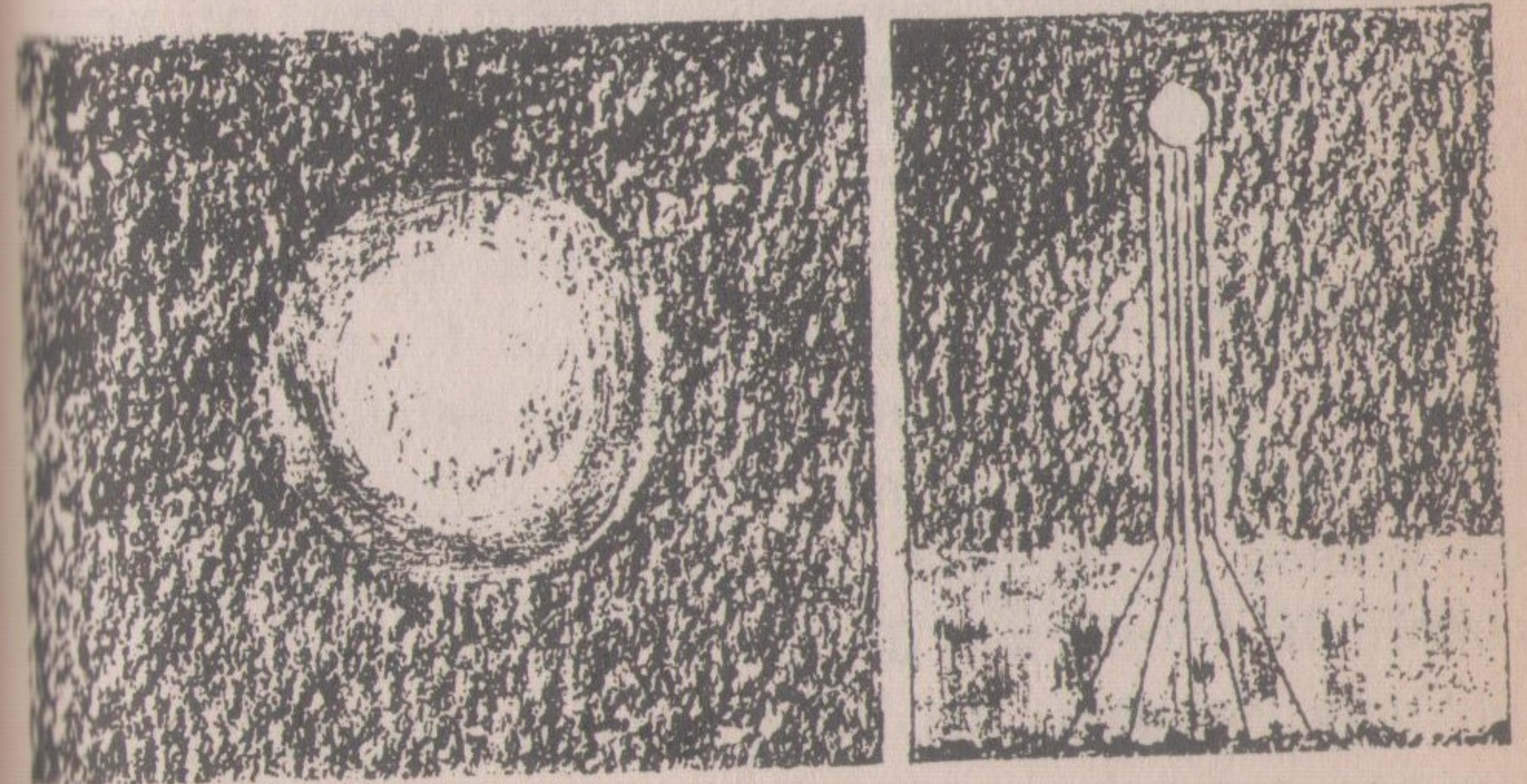


FIG. 26. Cuando se contempla la Luna a través de una bruma, aparece con un halo. Esto se debe a que los rayos de la Luna son desviados por las partículas de la bruma.

un halo que rodea a la Luna, debido a la difracción de la luz de ésta por las partículas que constituyen la niebla. Cuando el astrónomo contempla una estrella, a menudo puede reconocer su tipo por sus líneas espectrales. Sabe entonces qué color debería presentar la estrella si no hubiera nada que interceptara su luz en su trayecto para llegar hasta nosotros. Pero a menudo, en el plano de la Vía Láctea, una estrella parece más roja de lo que cabe esperar, particularmente si se trata de una estrella muy lejana. La conclusión es clara. La luz de la estrella enrojece por la presencia de una niebla de materia interpuesta entre la estrella y nosotros, así como la luz del Sol enrojece por la niebla atmosférica durante el crepúsculo. Un minucioso estudio, realizado por medio del espectroscopio, del efecto que produce sobre la luz de la estrella el paso por la nube, puede permitir al astrónomo descubrir de qué está compuesta la nube, o al menos cuáles son algunos de sus constituyentes. Resulta de ese examen que muchas nubes contienen polvo, semejante al polvo terrestre, en el que hay calcio, carbono y otros elementos. El espacio es muy frío y no es rara en él la presencia de granos de metano congelado. También es frecuente la formación de halos. La fotografía de la llamada Nebulosa del Búho (lámina XII) nos muestra una nube de gas iluminada por una estrella que está detrás de ella. A veces, también, las nubes chocan unas contra otras a grandes velocidades, lo que hace que algunas partes de ellas se pongan incandes-

centes por la enorme fricción que se produce. También es posible que en ciertas ocasiones, la incandescencia de una nube se deba a ondas de choque, como las que se producen en la Tierra después de una explosión. Un bello ejemplo de esto es la nebulosa filamentosa que aparece en la figura 27. Si solo hubiera unas pocas nubes en el espacio, habría pocas esperanzas de ver colisiones entre ellas o hallar una estrella situada en posición tan especial que pudiera iluminar a toda una nube. Por eso, de los muchos casos de estos efectos que conocemos, podemos deducir cuánta materia hay en el espacio entre las estrellas. Desde el punto de vista teórico esto no tiene nada sorprendente, pues es muy probable que las



Fig. 27. Algunas nubes de polvo y otras materias interestelares chocan entre sí a altas velocidades. La enorme fricción que produce el choque hace que algunas partes de la nube se enciendan y provoquen el hermoso efecto, que se ve en este cuadro, de una nebulosa filamentosa.

estrellas se formen a partir de esa materia difusa y crezcan alimentándose de ella.

Polarización de la luz estelar

Hay otro tipo de indicios acerca de lo que ocurre en el espacio entre las estrellas que solo se ha descubierto recientemente. Se trata de la polarización de la luz estelar. ¿Qué es la polarización y cómo podemos detectarla? La luz tiene una cantidad de propiedades que nos son familiares. Se propaga en línea recta a una velocidad definida; tiene una intensidad, es decir, un brillo y puede ser de alguno de los colores conocidos o de una combinación de ellos. Pero éstas no son todas las características de la luz; queda una, la polarización que es difícil de observar. Hay una dirección asociada a la luz, que es invariablemente perpendicular a la dirección de propagación y que recibe el nombre de dirección de polarización. La mayoría de las sustancias materiales no permiten distinguir entre la luz polarizada en distintas direcciones; pero algunos cristales y otros materiales son trasparentes a una dirección de polarización y opacos a otras.

Si tomamos dos de esos cristales y hacemos pasar por ellos un rayo de luz, el primero seleccionará de toda la luz del rayo, aquella que esté asociada a una particular dirección dentro del cristal. Podemos imaginar cada partícula de luz como si llevara una varilla normal a la dirección de propagación. El cristal actúa entonces como una valla de largas barras paralelas que no dejan pasar la luz que lleva varillas perpendiculares a las barras, sino solamente a la que lleva varillas paralelas a ellas. Luego, si se coloca el segundo cristal paralelamente al primero, toda la luz que pasó por éste pasará también por el segundo. En cambio, si se lo coloca perpendicularmente al primero, no pasará nada de luz, pues la dirección de la varilla que pudo pasar por el primero es justamente la que no puede pasar por el segundo, porque las direcciones de los postes de las dos vallas son perpendiculares entre sí. Aunque los cristales ponen de manifiesto este fenómeno de la polarización mucho más intensamente que cualquier otra sustancia material que podamos encontrar en la vida cotidiana, hay ocasiones en que la polarización también se manifiesta en ella. La mayor parte de la luz que nos rodea no está polarizada; esto es, las varillas que las partículas individuales transportan se hallan dispuestas en todas las direcciones. La dirección de polarización de la luz no está ordenada, por decir así. Uno de los pocos fenómenos cotidianos en los cuales es importante la polarización es el resplandor. Si un rayo de luz casi horizontal es reflejado por una superficie húmeda, por ejemplo una calle húmeda, la dirección horizontal de polarización es reflejada con mucha más intensidad que la vertical. Por eso, el resplandor de los faros de los autos o de las luces de la calle que se reflejan sobre el pavimento está polarizado principalmente en el plano horizontal. Es decir, las varillas transportadas por las partículas de la luz que se refleja sobre el camino son en su mayoría

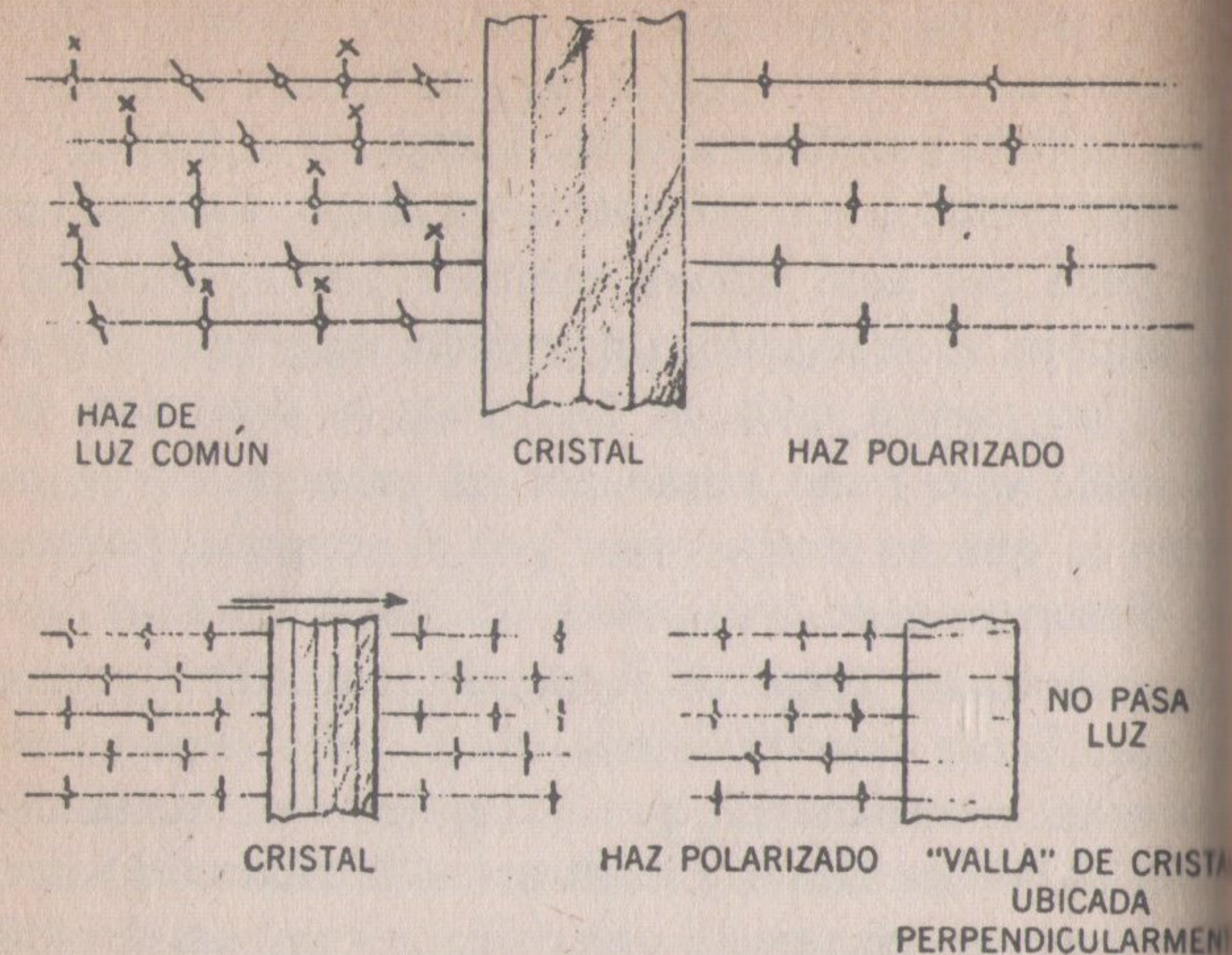


FIG. 28. La luz viaja recta a una determinada velocidad, pero también tiene un movimiento oscilatorio perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Ciertos cristales polarizan la luz, esto es, solo trasmiten la luz cuyo movimiento trasversal se halla orientado en determinada dirección. Si esta luz pasa a través de un cristal orientado en la misma dirección que el primero, se trasmite toda la luz. Si en el camino de la luz se coloca un tercer cristal girado en 90° respecto del segundo, no se trasmite luz.

horizontales. Si miramos la calle a través de un crist que solo deja pasar la luz polarizada verticalment la cantidad de resplandor que atraviesa el cristal ser menor que la de cualquier otra luz. En esto resid la ventaja de usar anteojos polarizadores para gui de noche cuando hay humedad.

La polarización se manifiesta también de otras maneras, especialmente en las ondas de radio cortas. Ésta es la razón por la que las antenas de TV tienen que ser verticales, mientras que las antenas sonoras de elevada frecuencia tienen que ser horizontales. En un caso el trasmisor solo emite ondas de radio polarizadas horizontalmente, mientras que en el otro solo trasmite las polarizadas verticalmente. Cuando el astrónomo examina la luz de las estrellas para tratar de determinar si está polarizada —esto es, si la cantidad de partículas de luz que llevan varillas dirigidas en determinada dirección es mayor que las partículas que llevan varillas en otras direcciones—, descubre que, en efecto, la luz de ciertas es-

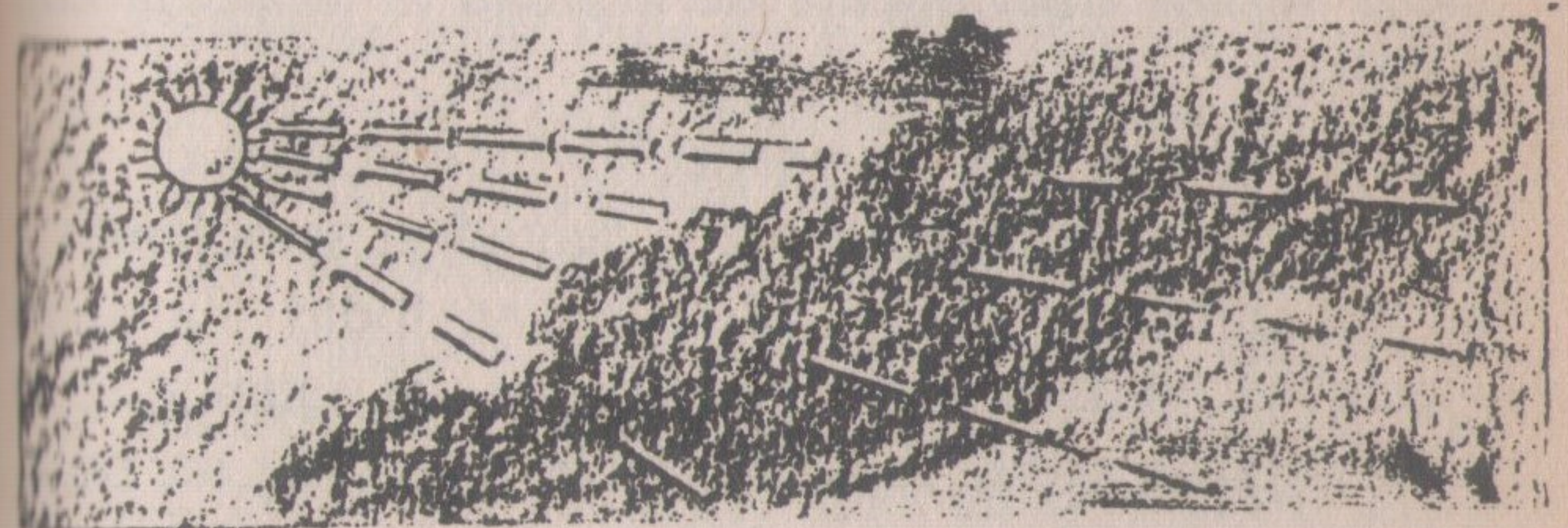


FIG. 29. Al igual que ciertos cristales, algunas nubes de gas del espacio polarizan la luz, es decir, solamente trasmiten la luz cuya vibración trasversal se produce en determinada dirección.

trellas se halla notablemente polarizada. En particular, descubre que en muchas de las estrellas cuya luz

enrojece al pasar a través de una bruma de materia interestelar, esta polarización es muy considerable, pues hay un porcentaje mayor de luz que lleva varillas en una determinada dirección. ¿Cómo puede explicarse este notable descubrimiento moderno? Es sumamente difícil concebir que una estrella como un todo, pueda emitir luz polarizada, en lugar de luz no polarizada. Si a esto se agrega el hecho que la luz más polarizada es la que pasa a través de la niebla interestelar, podemos suponer que la polarización se produce al atravesar esa materia interestelar. Pero, ¿de qué manera se produce? La materia interestelar no es un cristal, ciertamente. No es como si contempláramos las estrellas a través de enormes cristales alineados que flotan en el espacio. La materia interestelar es solamente gas y polvo. El gas no puede polarizar nada, pero, ¿qué ocurre con el polvo? Aquí puede sernos nuevamente de utilidad la analogía con la valla.

Supongamos que las partículas individuales de polvo son como barritas largas y delgadas, semejantes a las limaduras de hierro. Si se hallan todas alineadas —esto es, si todas son paralelas—, al igual que la valla dejarán pasar más luz en la dirección de polarización paralela a las barritas que en la dirección perpendicular a éstas. Por eso, nos vemos conducidos a pensar que, al menos parte del polvo interestelar, quizá consista en partículas similares a las barritas. Pero, ¿cómo llegan a alinearse? No es fácil responder a esta pregunta, pero lo que surge de inmediato en la mente es el conocido cuadro de las limaduras de

hierro alineadas por la acción de un imán. En realidad, no es fácil concebir alguna otra causa que pueda producir el alineamiento de las partículas de polvo entre las estrellas. Parece, pues, que la causa más probable del ordenamiento del polvo sea la presencia de un campo magnético, que lo “peinaría” en una determinada dirección.

Corrientes eléctricas en el espacio

Nos vemos inducidos, entonces, a pensar que quizás haya campos magnéticos en los espacios entre las estrellas. Pero, ¿cómo se originan estos campos magnéticos? Aun si las estrellas fueran magnéticas, como sabemos que algunas lo son, su campo no puede extenderse muy lejos en el espacio. Es lo mismo que ocurre en la Tierra. Aunque tengamos un campo magnético bastante intenso como para desviar la aguja de una brújula, si nos alejamos hasta llegar a la Luna no quedará nada de este campo magnético. Por consiguiente, debemos buscar el origen de este campo, no en las estrellas, sino en el espacio interestelar mismo. ¿Qué es lo que puede originar en él los campos magnéticos? La única causa razonable que podemos imaginar es la formación de corrientes eléctricas. En verdad, no es arbitrario suponer que circulan corrientes eléctricas a través de los vastos espacios interestelares. Pues, aunque un gas espeso como el aire es un buen aislante, puede demostrarse que un gas tenue como el que llena los espacios

entre las estrellas y que absorbe radiación luminosa, es un magnífico conductor de la electricidad. No es necesario ningún esfuerzo, virtualmente, para mantener una corriente en ese medio una vez que ha comenzado a circular en él. Por eso, no sorprende que tales corrientes puedan persistir en ese medio durante enormes períodos de tiempo, originando campos magnéticos cuyos efectos podemos observar en la polarización de la luz estelar. Qué es lo que originariamente produjo los campos magnéticos es otro problema, como es de suponer, problema respecto del cual todavía no se tiene en vista una respuesta clara.

A pesar de los pocos indicios de que dispone, el astrónomo, sin embargo, puede saber muchas cosas acerca de las condiciones que prevalecen en el espacio interestelar. Sabe que hay grandes nubes de polvo y que hay gas, parte del cual puede hallarse disperso sobre grandes extensiones y parte hallarse condensado también en nubes. Asimismo, puede saber algo acerca de la composición química de las nubes de polvo y de gas. También ha podido inferir de sus datos la existencia de campos magnéticos en esas inmensas regiones. Otro camino por el que puede explorarlas es por la radioastronomía. Se ha descubierto que el gas hidrógeno, uno de los más difíciles de observar por medios ópticos y el más común de los elementos que se encuentran en el espacio interestelar, emite ondas de radio de una frecuencia muy particular. Estas ondas pueden ser captadas desde la Tierra y nos suministran una información muy rica, antes imposible de obtener ópticamente, acerca de la distribución del hidrógeno en el espacio entre las estrellas. Por estos medios hemos llegado a saber que en las nubes de gas y polvo del espacio se producen remolinos cuyos movimientos y conducta son de la mayor importancia para las estrellas mismas, aunque el gas y el polvo sean mucho menos fáciles de observar que las estrellas, cuyo brillo constituye un rasgo tan importante de nuestro cielo nocturno.

Capítulo 8

Zonas de radiación de la Tierra

Uno de los más hermosos espectáculos naturales que pueden verse en la Tierra es la Aurora Polar.



FIG. 30. Existe una estrecha relación entre la frecuencia de las manchas solares y la aparición de luces polares, producidas por corrientes de partículas cargadas que lanza el Sol al espacio. Al aproximarse a la Tierra, sufren la influencia del campo magnético terrestre y llegan a la atmósfera superior en las zonas polares, donde producen los fenómenos conocidos como Aurora Borealis (en el Norte) y Aurora Australis (en el Sur).

En algunas regiones de la Tierra, casi todas las noches pueden verse en las regiones elevadas de la atmósfera enormes bandas luminosas ondulantes, a veces rojas, a veces azules, que ofrecen un grandioso y bellísimo aspecto. En Inglaterra, raramente se las puede ver; pero son claramente visibles en Canadá y Alaska. En ocasiones, puede verse la Aurora Polar en regiones mucho más distantes.

Ha habido oportunidades en que, en Inglaterra, el cielo septentrional parecía tener un color rojo brillante. Este efecto era tan inesperado e intenso, durante esas noches, que muchas personas llamaban al cuartel de bomberos, pues creían que tal resplandor debía provenir de algún incendio en la vecindad. Algunas veces, se ha podido ver la Aurora Polar desde una región tan alejada hacia el Sur como el Mediterráneo.

Aurora

¿Qué es la Aurora Polar y por qué aparece solamente en determinadas regiones? Será mejor considerar primero su distribución geográfica. Se observa que esta distribución está relacionada con el magnetismo de la Tierra. Como todos sabemos, la Tierra se comporta como un enorme imán, propiedad sumamente útil, en verdad, pues permite al navegante

hallar el Norte mediante el simple uso de una brújula magnética, como lo descubrieron los chinos hace mucho tiempo. Pero, desgraciadamente, la dirección indicada por la aguja magnética no señala exactamente el Polo Norte. No solamente hay desviaciones locales que pueden deberse, por ejemplo, a grandes depósitos de hierro, sino que el polo magnético de

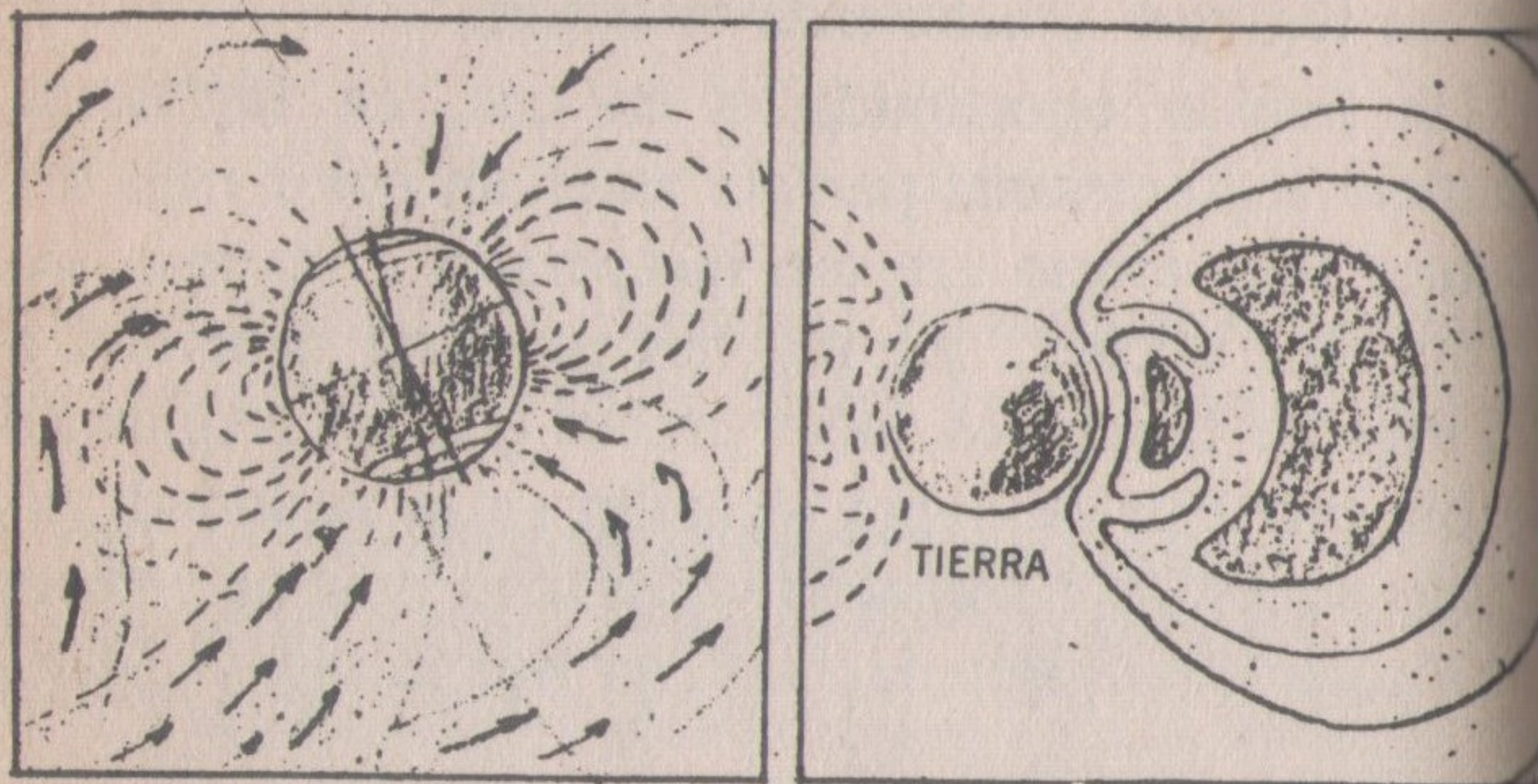


FIG. 31. Algunos piensan que la Aurora quizás se deba al efecto que las partículas cargadas del Sol producen sobre las moléculas de la atmósfera. Las partículas cargadas desviadas por el campo magnético terrestre penetran en las zonas de las luces polares y hacen que las moléculas emitan luz. Las bandas blancas indican la región en la que aparece la Aurora. Las fajas de radiación que rodean a la Tierra están representadas a la derecha en función de la concentración de las partículas en las diferentes regiones. Las regiones oscuras indican una concentración relativamente elevada de partículas y las más claras las zonas de menor concentración.

la Tierra, como se lo llama, no coincide con el Polo Norte geográfico. El Polo magnético terrestre se en-

cuentra justo al Norte de la isla del Príncipe de Gales, en Canadá. Si se dirige la vista hacia donde la Aurora se ve con mayor frecuencia, se observa que forma una faja que se extiende a unos 7.200 kilómetros del Polo Norte magnético. Como este polo se encuentra en Canadá, esa faja en la cual la Aurora se ve con mayor frecuencia llega muy al Sur en este país. En Canadá, Alaska y, en cierta medida, en Islandia la Zona Auroral pasa por regiones pobladas. También hay una Zona Auroral Austral, que forma una faja análoga alrededor del Polo Magnético Sur, situado en la Antártida. Esta zona no pasa por regiones pobladas, ni por rutas donde sea frecuente el paso de barcos o de aviones. Por eso la Aurora Austral no ha sido vista por tanta gente como la Aurora Septentrional, aunque también ha sido minuciosamente estudiada por los científicos. Es indudable, pues, que las auroras deben tener alguna relación con el magnetismo terrestre.

La Aurora está tan alta en el cielo que allí la atmósfera debe ser sumamente tenue; pero hay algo que la hace brillar. Pronto se sospechó que este algo debía ser partículas de movimiento rápido provenientes del exterior de la Tierra. Es evidente que el movimiento de estas partículas se halla afectado por el campo magnético terrestre. Esto significa que las partículas están cargadas eléctricamente. Muchos científicos han dedicado considerables esfuerzos a tratar de descubrir algo más acerca de estas misteriosas partículas que vienen del espacio exterior y pro-

ducen esa bella iluminación de las capas superiores de la atmósfera. No pasó mucho tiempo antes de que se la pudiera relacionar con perturbaciones en el campo magnético terrestre, que a su vez podían también deberse, según se sospechaba, a partículas provenientes del espacio. Estas mismas partículas también afectan la propagación de las ondas de radio y, por consiguiente, perturban la recepción de los mensajes de radio. Luego, resultó que todos estos fenómenos dependen de las manchas solares —las conocidas erupciones que aparecen en la superficie del Sol, luego desaparecen y vuelven a aparecer en ciclos de once años.

Partículas capturadas

Aunque estos interesantes fenómenos fueron estudiados muy intensamente, solo en los últimos años se logró una comprensión más clara de ellos gracias a las observaciones realizadas por medio de instrumentos colocados en cohetes y satélites artificiales que llegan a gran altura. Esto se debe a que, con estos aparatos, es posible llevar los instrumentos de observación a una altura mucho mayor que aquélla en la que aparece la Aurora. Los primeros satélites rusos, aunque llevaban grandes instrumentos, no tenían suficiente altura como para poder observar esos fenómenos con mucho detalle, pero los sondeos lunares norteamericanos, que fueron mucho más lejos en el espacio exterior, retornaron luego a través de

la atmósfera superior de la Tierra y suministraron mucha información. Resulta que a unos 16.000 kilómetros por encima de la superficie de la Tierra hay



FIG. 32. Las partículas cargadas oscilan continuamente en el espacio de un polo al otro. Recientemente, los cohetes espaciales detectaron las partículas capturadas y han demostrado que siguen el camino de las líneas de fuerza del campo magnético terrestre. Mostramos aquí el camino en espiral de una partícula a lo largo de una línea de fuerza del campo magnético, de polo a polo. Hay una enorme cantidad de tales partículas.

una enorme cantidad de radiación capturada; en esas regiones hay muchas más partículas cargadas de lo que se suponía. Son zonas de enorme extensión. La más grande se encuentra, en su punto más elevado (16.000 kilómetros), por encima del ecuador terrestre y va descendiendo a medida que se acerca a los polos magnéticos de la Tierra. En éstos, los extremos de esta faja de partículas están suficientemente bajos como para tocar la atmósfera exterior de la Tierra,

haciéndola brillar por el movimiento de las partículas y formando las auroras.

La segunda banda de radiación, más pequeña, se limita a las regiones ecuatoriales de la Tierra y está a unos 3.200 kilómetros por encima de su superficie. Podemos describir estas bandas de radiación como jaulas para atrapar partículas cargadas. Los barrotes de la jaula están constituidos por el campo magnético de la Tierra. Éste forma una especie de trampa; una nube de partículas cargadas, como las que provocan la interrupción de las comunicaciones de radio y las perturbaciones de la brújula, puede penetrar en esta jaula, pero luego no puede salir de ella. Una vez allí, las partículas se ven obligadas a seguir las líneas del campo magnético; se precipitan primero al Norte y luego al Sur, en un curioso movimiento en tirabuzón, repitiendo constantemente esta oscilación. Así, continúan allí indefinidamente, pues no hay nada que interfiera con ellas. Solo una porción muy pequeña de todas estas partículas desciende lo suficiente como para chocar con las moléculas de la atmósfera superior de la Tierra, con lo cual termina su carrera dentro de la faja de radiación. El resultado de estas colisiones es el brillo de la Aurora. Lo que vemos, pues, en la Aurora, es solo una pequeña parte de toda la radiación que hay en esa zona. Es similar a un *iceberg*, nueve décimos de cuya masa está por debajo de la superficie del mar. Mucho más que los nueve décimos de la radiación está por encima de la atmósfera, por lo cual no adquiere la visibilidad

del brillo auroral. Probablemente, la mayoría de esas partículas se originan en el Sol, en estallidos que se relacionan con la aparición de las manchas solares.

Es indudable que estas bandas de radiación presentan inconvenientes para el viajero del espacio. Si se desea realmente viajar a la Luna o más allá de ésta, será menester atravesarlas. A menos que se encuentre muy bien protegido, la radiación puede ser muy peligrosa para la salud del viajero espacial. Pero, la protección significa peso y el peso es muy costoso para los viajes espaciales. Estamos seguros que las limitaciones de peso van a ser mucho más rigurosas que en los viajes aéreos. Aunque esta banda de radiación pueda ser un obstáculo para nuestras ambiciones en el campo de los viajes espaciales, presentan un interés muy grande y muy estimulante para otra empresa humana quizá más útil, que es el intento por construir estaciones energéticas que trabajen basándose en el principio de la fusión nuclear. Se recordará que la fusión del hidrógeno para formar helio es la fuente de la energía del Sol y de la mayoría de las estrellas. Con el fin de lograr la enorme liberación de energía que podría resultar del uso de materiales comunes por este medio, es necesario obtener temperaturas muy elevadas, tan elevadas como las que hay en el centro de las estrellas. De este modo, se plantea el problema no solamente de cómo producir estas enormes temperaturas, sino de cómo construir recipientes que las contengan.

A esas temperaturas, toda sustancia se convierte en gas; por lo tanto, se necesita un recipiente que contenga gas a enormes temperaturas, como las que podrían obtenerse haciendo pasar a través del gas una corriente eléctrica intensísima. Ninguna sustancia puede resistir estas temperaturas. Pero se ha sugerido el uso de un campo magnético para contener el gas, así como en la faja de radiación que rodea a la Tierra las partículas se encuentran embotelladas en un campo magnético. Esta botella magnética parece ser la única solución al problema, pero nadie sabe en la actualidad si tal solución es o no posible. Se están realizando intensos estudios para resolver este problema, pues su solución nos permitiría disponer de la más barata y la más segura fuente de energía que se pueda imaginar.

Una planta generadora de energía por fusión tendría dos grandes ventajas sobre las estaciones de energía atómica basadas en la fisión, como la que existe en Calder Hall y las muchas que ahora se están construyendo en Gran Bretaña, los Estados Unidos, URSS, Francia y otros países. En primer lugar, la materia sería mucho más barata, pues en lugar de uranio se usaría hidrógeno, que, como constituyente del agua, es sumamente común. Probablemente sea necesario usar hidrógeno pesado, pero aun éste es mucho más abundante que el uranio. Pero más importante que esto es que en el centro de una estación energética basada en la fisión se forma una

ceniza altamente radiactiva que puede ser cada vez más difícil y costoso eliminar. En una estación energética basada en el principio de la fusión, si fuera posible construirla, no habría ninguna ceniza radiactiva. Los elementos, muy simples, que intervienen en este proceso conducen todos a productos perfectamente estables y que no presentan ninguna radiactividad.

Pero la construcción de una botella magnética adecuada parece ser extremadamente difícil. A pesar de los enormes esfuerzos realizados con aparatos de fusión experimentales, todavía no se ha encontrado ninguna solución al problema. Esto nos recuerda uno de los problemas que los alquimistas medievales trataban de resolver. Uno de sus objetivos, además de obtener oro, era hallar un solvente universal, es decir, un fluido que disolviera toda materia que entrara en contacto con él. Pero aún antes de poder hacer nada para elaborar este fluido, se enfrentaron con el absurdo problema de saber en qué lo colocarían, en caso de que pudieran hacerlo. ¿Qué botella podría contener un fluido que todo lo disuelve? Este es el problema con que se enfrentan los investigadores en el campo de la fusión y todavía no se ha demostrado que sea posible la única solución concebible —la botella magnética—, excepto en la faja de radiación de la Tierra.

Magnetismo en el espacio

La Tierra no es en modo alguno el único cuerpo

magnético del espacio. También el Sol tiene un campo magnético cuya fuerza es aproximadamente el mismo que el de la Tierra, pero tiene, además, campos magnéticos muy localizados y de intensidad mucho mayor asociados con las manchas solares. Es un tanto sorprendente que un cuerpo muchísimo más grande que la Tierra, como el Sol, tenga un campo magnético no mayor que el de ésta. Algunas estrellas tienen campos magnéticos muy intensos, miles de veces mayores que el de la Tierra. Pero, cosa más sorprendente aún, la dirección del campo magnético de algunas de estas estrellas parece cambiar en el lapso de unas pocas horas. Cómo es posible que tan gigantescos imanes puedan girar en un período tan corto, es algo que, hasta ahora, escapa totalmente a todos nuestros intentos por hallar una explicación.

Antes del advenimiento del motor eléctrico, hace menos de un siglo, el único uso que se hacía del magnetismo sobre la Tierra era la brújula del marino y algunos juguetes. En la actualidad, producimos campos magnéticos en todo género de maquinarias, especialmente en los generadores y motores eléctricos, pero los campos magnéticos naturales sobre la Tierra parecen ser débiles y no tener mucha importancia. En el espacio, parece ocurrir lo contrario. Es cada vez más evidente que, a medida que nos alejamos de la Tierra, el magnetismo adquiere una importancia creciente. En nuestra vecindad, esto se revela a través de las bandas de radiación de las que hemos hablado. Mucho más lejos, las estrellas magnéticas y, sobre todo, los campos magnéticos interestelares constituyen una fuerza predominante. No

lograremos comprender cabalmente la formación de las galaxias hasta que no tengamos una clara comprensión de los campos magnéticos del espacio exterior.

Capítulo 9

Ley de gravitación

Hace casi trescientos años, Sir Isaac **Newton** formuló la Ley de gravitación. Fue la primera de las grandes fuerzas de la naturaleza que se describió de una manera útil y fértil. Según la conocida anécdota, fue la caída de una manzana lo que sugirió a Newton la posibilidad de que el movimiento de la Luna se debiera a la misma fuerza que el movimiento de la manzana. No siempre se aprecia la magnitud de este avance. Newton trató de hallar, y lo logró, la ley que relaciona objetos tan diferentes en tamaño y en distancia de la Tierra como la manzana y la Luna. La Luna, a 400.000 kilómetros de distancia, está cien millones de veces más lejos de la superficie de la Tierra que lo que estaba la manzana cuando comenzó a caer; y el diámetro de la Luna está respecto del de la manzana en una proporción casi igual. Cuando un científico propone una ley de la naturaleza, su propósito es describir el mayor número posible de acontecimientos naturales diferentes; pero fue una gran audacia sugerir que dos acontecimientos tan distintos como el movimiento de la Luna y el de la manzana pudieran incluirse dentro de una misma ley. Y no solamente la ley colma este abismo, sino que su validez también puede extenderse en ambas direcciones. Además del movimiento de la Luna, alrededor de la Tierra, también describe el movimiento de los planetas alrededor del Sol, extensión que significa un aumento de mil veces en tamaño. Aún más allá de esto, la misma ley que rige el movimiento de la

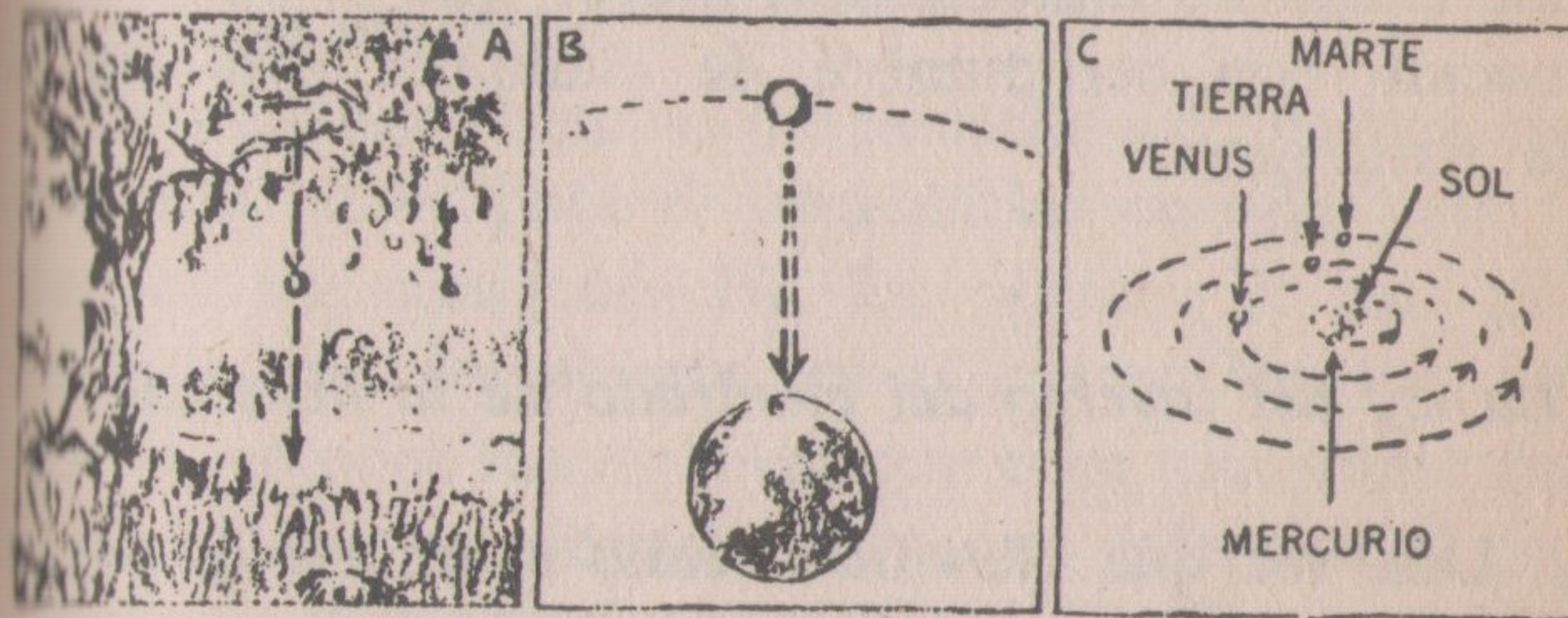




FIG. 33. La caída de la manzana sugirió a Sir Isaac Newton la Ley de la gravitación. Su ámbito de validez es enorme. En efecto, esa ley gobierna, no solamente la caída de una manzana, sino también el movimiento de la Luna alrededor de la Tierra, el de los planetas alrededor del Sol, el de las estrellas en una galaxia y hasta el de las galaxias en un cúmulo.

manzana gobierna los movimientos de las estrellas binarias, los movimientos de las estrellas en la galaxia y, muy probablemente también los movimientos de las galaxias en los cúmulos de galaxias. En este último caso, las distancias entre las galaxias son un millón de millón de veces mayores que la distancia entre la Luna y la Tierra. Por lo tanto, la Ley de la gravitación de Newton abarca un enorme rango de dimensiones, mayor que el ámbito conocido con certidumbre de cualquier otra ley de la naturaleza.

La ley del inverso del cuadrado de la distancia

Una vez que Newton decidió examinar la posibilidad de que el movimiento de la Luna se debiera a la atracción gravitacional de la Tierra, al igual que

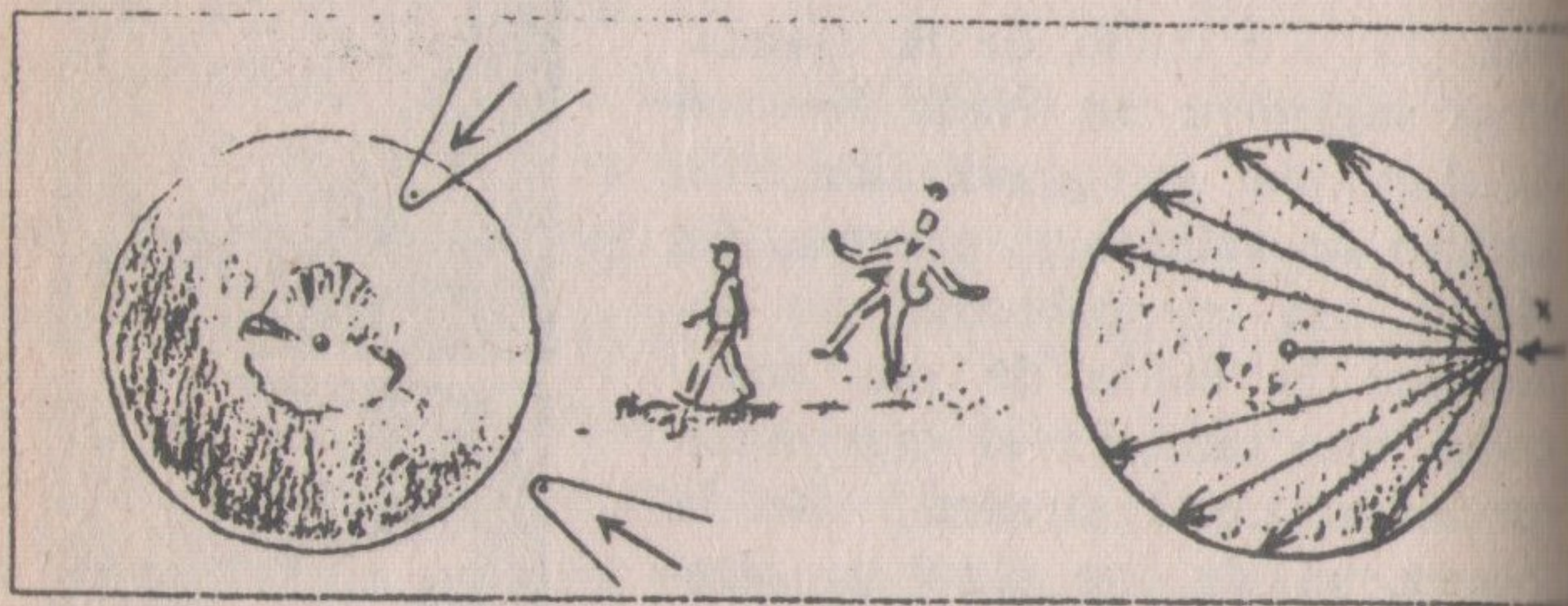


FIG. 34. La Fuerza de atracción que produce una esfera. Fue necesario calcular la suma de las fuerzas de atracción. Newton descubrió que si un cuerpo es esférico (la Tierra es de forma casi esférica), la atracción de toda la esfera sobre cada partícula (ver a la izquierda) interior o exterior a la Tierra es la misma que se ejercería si toda la masa estuviera concentrada en el centro de la esfera. Ninguna otra ley de fuerzas tiene esta propiedad. Una persona situada sobre la Tierra, por ejemplo en x (ver a la derecha), es atraída por todas las partículas que forman la Tierra. Cada una la atrae en su propia dirección, pero las atracciones se combinan de modo tal que la fuerza de gravedad se halla dirigida hacia el centro de la Tierra. Si esta atracción gravitacional cesara repentinamente la persona se alejaría volando por el espacio.

la caída de la manzana, tenía aún que determinar cómo variaba esta fuerza en función de la distancia a la Tierra. La solución que propuso se conoce como la ley del inverso del cuadrado de la distancia. Esta ley afirma que la atracción gravitacional de un cuerpo varía en proporción inversa al cuadrado de la distancia. En otras palabras, si se duplica la distancia, se reduce la fuerza de la atracción a un cuarto de lo que era antes.

Esta ley tiene muchas propiedades interesantes, que son muy útiles para el matemático cuando trata de deducir sus consecuencias. La primera de esas propiedades fue descubierta por el mismo Newton, mediante métodos matemáticos que eran totalmente desconocidos en su tiempo. Tuvo que enfrentar el problema de que si cada partícula de la Tierra atrajera la manzana (y, naturalmente, también a la Luna), era menester calcular la suma de todas esas atracciones antes de poder determinar la velocidad con que cae la manzana (o la Luna). Estas atracciones difieren tanto en cantidad (debido a la gran diferencia

de las distancias entre las distintas partículas de la Tierra y la manzana) como en dirección. ¿Cómo es posible sumarla todas? En realidad, tal suma sería un cálculo muy difícil de hacer, pero afortunadamente la Tierra es de forma casi esférica. Si se supone que tiene una completa simetría esférica, entonces, como halló Newton, la atracción de toda la Tierra sobre toda partícula exterior a ella actúa como si toda la masa estuviera concentrada en su centro. Se trata de un resultado notablemente simple, que no se encuentra en ninguna otra ley de fuerza. Otro resultado notable, íntimamente relacionado con el anterior, es el concerniente al campo interior a una caparazón esférica de materia.

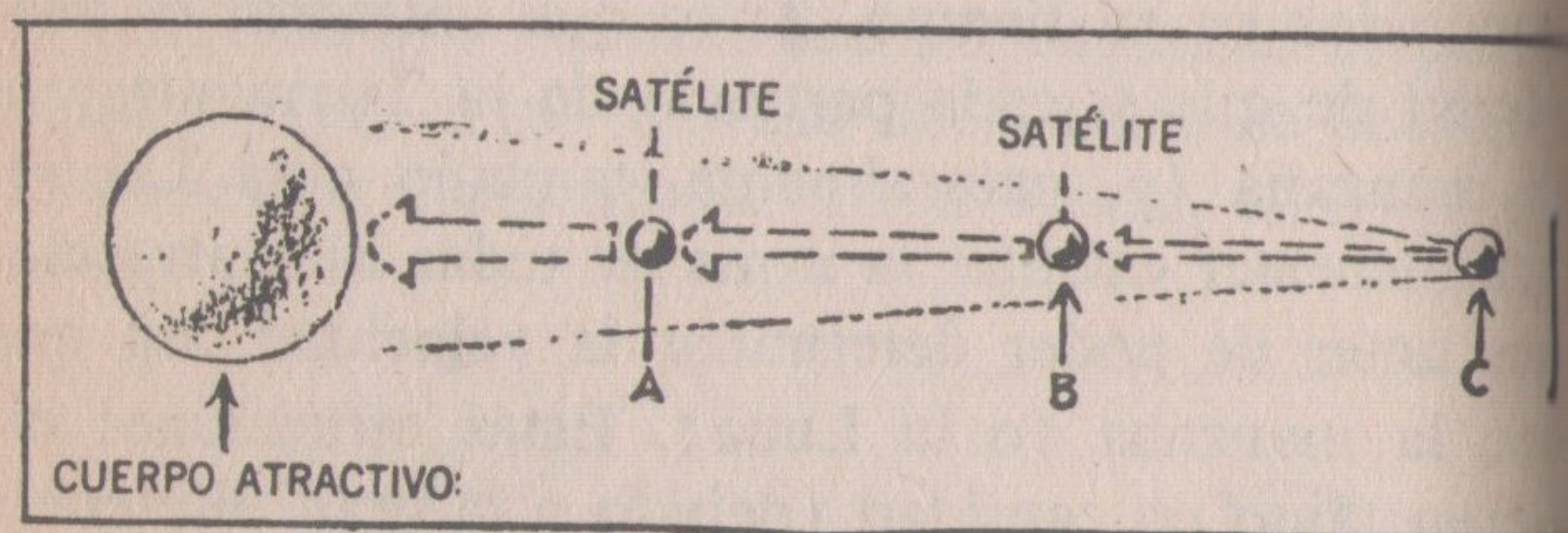


FIG. 35. Cuando Newton examinó la posibilidad de que el movimiento de la Luna se debiera a la atracción gravitacional de la Tierra, tuvo que determinar además cómo variaba la atracción en función de la distancia. El resultado que obtuvo se conoce como la ley del inverso del cuadrado de la distancia. En A, el astro ejerce una cierta fuerza sobre el satélite; cuando éste se halla dos veces más lejos, en B, solo experimenta un cuarto de la fuerza que experimentaba en A. A una distancia tres veces mayor (C), la fuerza se reduce a un noveno de la de A.

Imaginemos que el espacio entre dos esferas concéntricas se halle lleno uniformemente de materia. ¿Cuál es la atracción que ejercerá esta materia sobre un punto interior? Si consideramos una partícula situada en el interior, pero no en el centro, la atracción, por simetría, debe ejercerse a lo largo del diámetro que pasa por la partícula. Pero, puede ejercerse hacia la parte de la caparazón más cerca a la partícula o en la dirección opuesta. La parte de la caparazón más cercana a la partícula tiene menos masa, pero está más próxima a ella. ¿Cuál de estas dos influencias opuestas prevalecerá? El resultado es que, según la ley del inverso del cuadrado de la distancia, y solamente por esta ley, no se produce ninguna atracción en el interior de la caparazón. Si la fuerza dependiera en mayor medida de la distancia, la partícula sería atraída hacia la parte del caparazón más cercana a ella; si su dependencia de la distancia fuera menor, sería atraída hacia el lado opuesto, esto es, hacia el centro. La ley del inverso del cuadrado de la distancia cae exactamente entre estas dos posibilidades — sobre la partícula no se ejerce ninguna fuerza. De estas propiedades de la ley del inverso del cuadrado de la distancia es posible deducir otra.

Túneles a través de la Tierra

Supondremos que la Tierra es exactamente esférica y su composición uniforme. Si hacer túneles

fuera barato y sencillo podríamos imaginar la siguiente manera de ir desde cualquier punto de la superficie de la Tierra a cualquier otro: podríamos hacer un túnel recto a lo largo de la línea que une los dos puntos. Si los dos lugares se hallan relativamente próximos, las bocas del túnel tendrán una pequeña inclinación; si los lugares están muy alejados, la inclinación será pronunciada; y si se desea conectar un lugar con sus antípodas, el túnel tendrá que ser

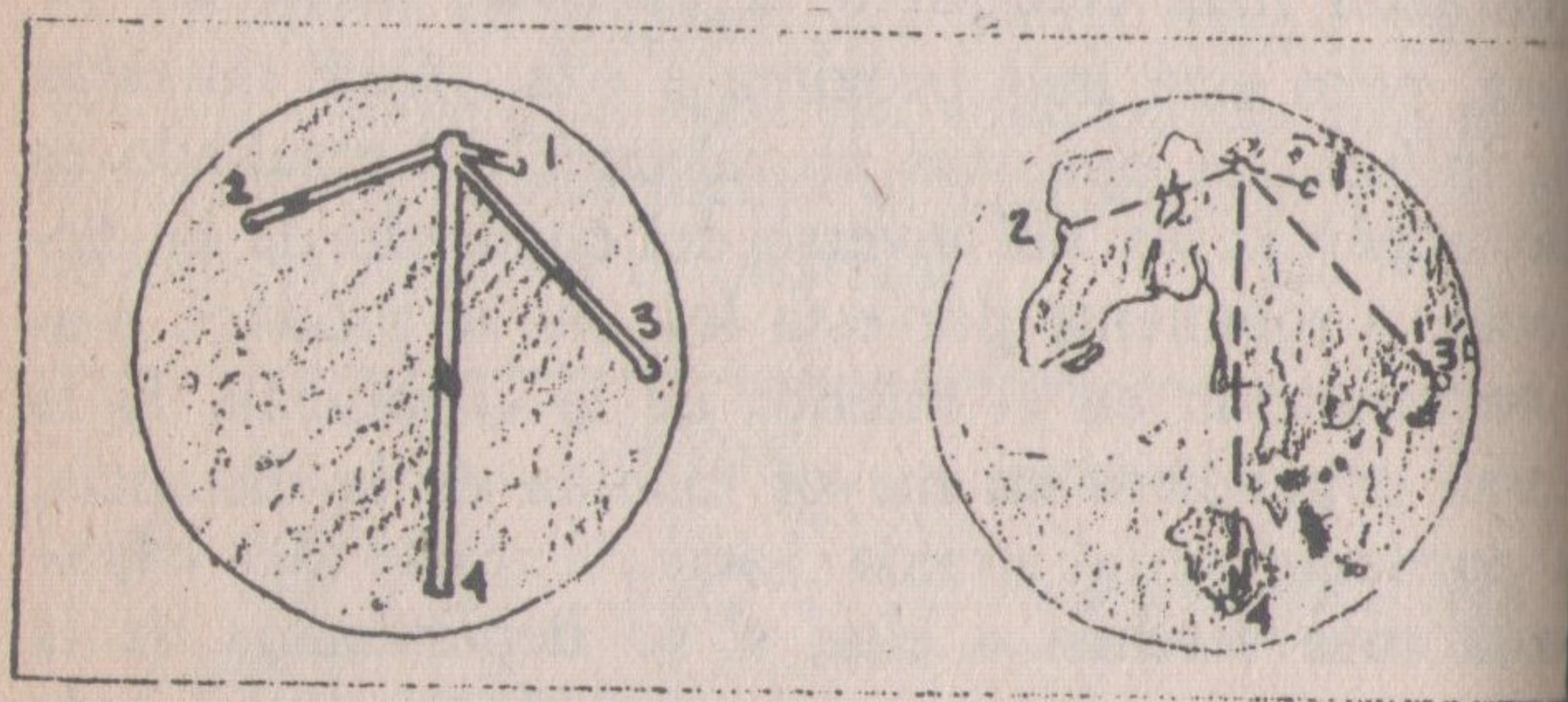


FIG. 36. Una propiedad interesante de la ley del inverso del cuadrado de la distancia es el hecho que el ángulo de descenso rige tanto la velocidad como la distancia cubierta. Así, si fuera posible cavar una serie de túneles rectos a través de la Tierra hasta lugares ubicados a distintas distancias, los túneles tendrían una inclinación diferente según la posición geográfica de estos lugares. Los viajeros podrían llegar a ellos simplemente deslizándose por los túneles. Un túnel largo, por ser empinado, sería atravesado a gran velocidad; uno más corto, cuya inclinación —por lo tanto— fuera más suave, podría ser atravesado en un viaje hecho a escasa velocidad. Resulta así que llevaría el mismo tiempo realizar cualquiera de esos viajes, o sea 42 minutos.

vertical y pasar por el centro de la Tierra. Supongamos, además, que aplicamos al túnel un lubricante muy bueno, de modo que podamos deslizarnos a través de éste sin ninguna fricción. Podemos suponer, por ejemplo, que el piso del túnel está cubierto de hielo y que somos hábiles patinadores. Tan pronto como penetremos en el túnel, comenzaremos a deslizarnos debido al hecho que el túnel está dirigido hacia abajo; cuanto mayor sea la pendiente del túnel, tanto más rápidamente avanzaremos. Nuestra velocidad aumentará cada vez más hasta que lleguemos al punto medio del túnel, lugar en el que nos hallaremos más cerca del centro de la Tierra. Desde aquí en adelante comenzaremos a acercarnos nuevamente a la superficie, esto es, comenzaremos a ascender, aunque la dirección del túnel sigue siendo la misma. De este modo, nuestra velocidad disminuirá y nos detendremos en el momento en que lleguemos a nuestro destino.

¿Cuánto dura este viaje? Si queremos ir a un lugar que no esté muy lejos, no tendremos que cubrir una distancia grande, pero, por otro lado, como la inclinación de nuestro túnel es pequeña no avanzaremos muy rápido. Si queremos ir a un lugar lejano, tendremos que recorrer una distancia grande, pero comenzaremos con una aceleración muy elevada. Resulta, nuevamente, que estas dos influencias se anulan. Sea cual fuere el lugar al que querramos ir mediante este método, nos llevará exactamente el mismo tiempo, *o sea 42 minutos*. Quizás no sea una velocidad muy grande si solamente queremos ir a un

lugar que está a 2 kilómetros de distancia, pero es sumamente elevada si vamos a un lugar lejano de la Tierra. En la realidad, como es de suponer, no solo es sumamente costoso hacer túneles y el deslizamiento sin fricción es técnicamente imposible, sino que la Tierra no es totalmente uniforme. Las regiones centrales son mucho más densas que las exteriores. Si proyectáramos hacer túneles a través de esta Tierra no uniforme, los viajes a lugares muy distantes serían algunos minutos más rápidos que en el caso de que fuera uniforme, pero los viajes a localidades cercanas serían iguales.

Ausencia de peso

Una de las propiedades más notables de la gravitación fue descubierta por Galileo antes de la época de Newton: es el hecho que todos los cuerpos caen con la misma velocidad. Es este carácter universal de la gravitación lo que la distingue más netamente de todas las otras fuerzas. No hay manera de escapar de la gravitación, aunque muchos escritores de ciencia-ficción, desde los comienzos de este género, han especulado sobre esta posibilidad. Según todo nuestro conocimiento, la ley de Galileo es exacta: todos los cuerpos, sin excepción, caen con igual rapidez. La caída libre es una experiencia que pocos de nosotros hemos hecho, pero podemos tratar de imaginarnos qué sentiríamos. Supongamos que nos

hallamos dentro de una casilla que cae libremente. Nosotros y todos los objetos que nos rodean seguirían el mismo movimiento, puesto que todos los cuerpos caen con igual rapidez. Dentro de la casilla, pues, la gravitación no existiría. Habría sido suprimida por la caída libre. No podríamos volcar agua de un vaso, pues el agua no sabría qué camino tomar, al no haber gravitación. Podemos, sin embargo, dar un tirón al vaso y dejar el agua detrás como burbujas flo-

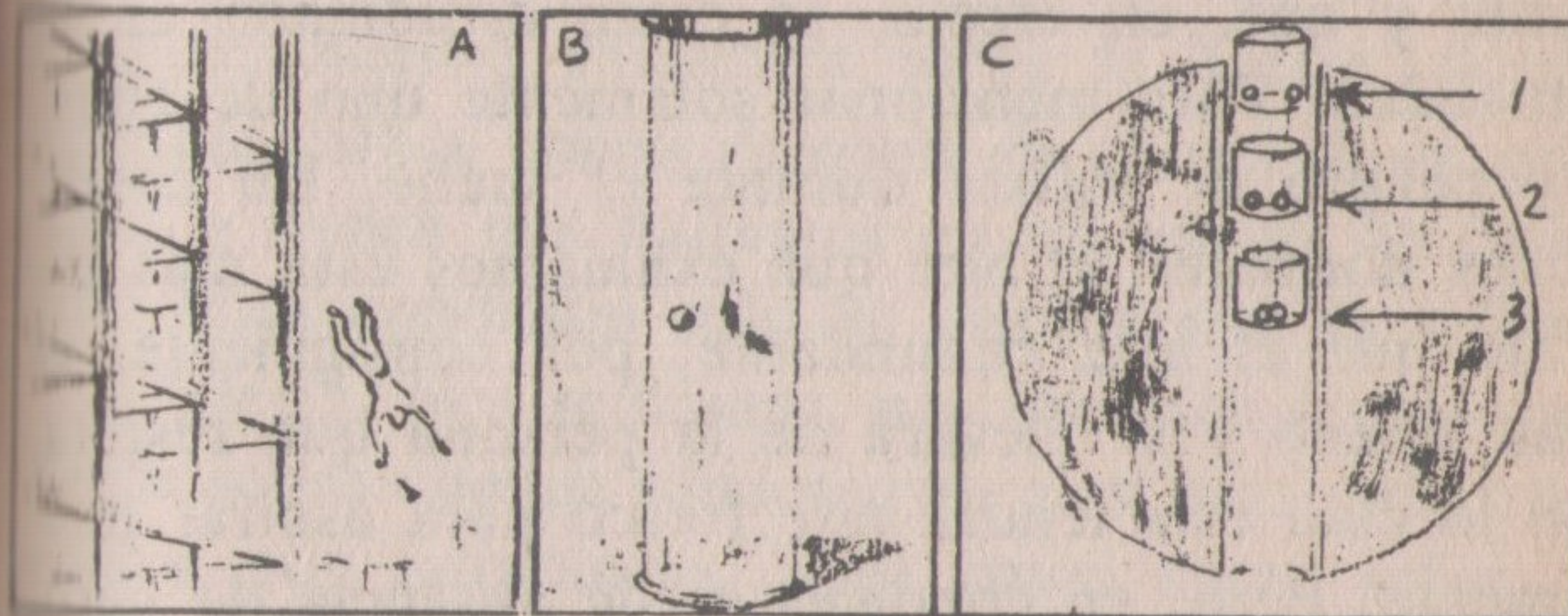


FIG. 37. Una de las propiedades más notables de la gravitación es que todos los cuerpos caen con la misma rapidez. Por ejemplo, si un obrero se cae de un edificio en construcción (A), cae a la misma velocidad que las herramientas que manejaba en el momento de caerse. Esta propiedad distingue a la gravitación de todas las otras fuerzas. Para determinar con precisión esta propiedad de la gravitación, es menester eliminar la resistencia del aire mediante el uso de un tubo de vacío. En este tubo, una bola de acero y una pluma largadas simultáneamente llegan abajo al mismo tiempo (B). En una caída libre prolongada (C), las partículas tienden a atraerse mutuamente. Tomemos una caja que contenga dos partículas. Supongamos que la caja comienza a caer a lo largo de un túnel que pasa por el centro de la Tierra. A medida que la caja cae, las partículas se van acercando y finalmente chocan en el centro de atracción (3).

tantes. Nosotros mismos flotaríamos sin peso y toda la situación sería muy extraña. Esta situación debe ser estudiada minuciosamente para la preparación de los vuelos espaciales. Una vez apagados los motores del cohete propulsor de la nave espacial, ésta y sus habitantes caen libremente. Es menester acostumbrarse, pues, a viajar en este estado de ausencia de peso. Se plantean muchos problemas de carácter médico y físico que es necesario estudiar detalladamente y que, en efecto, se están estudiando en la actualidad. Para mencionar solamente uno de ellos; hay peligro de asfixia durante el sueño. En condiciones normales, el aire que exhalamos está más caliente que el aire circundante; por consiguiente, es más liviano y se elevará de la persona que respira, con lo cual ésta tendrá aire fresco para aspirar nuevamente. Pero, en condiciones de ausencia de peso, la liviandad relativa del aire exhalado no le impartirá ningún movimiento, pues al no haber gravedad no habrá ninguna dirección en la cual "elevarse". Por eso, sin una gran cantidad de ventiladores, el sujeto (particularmente durante el sueño) respirará el mismo aire que exhala, lo que tendría consecuencias desastrosas. Toda la situación es tan diferente de aquélla a la que estamos acostumbrados, que será necesario realizar cuidadosos estudios para poder resolver satisfactoriamente los problemas que plantea.

La gravitación según Einstein

La naturaleza universal de la gravitación constituye la base esencial de la sucesora de la teoría gravitacional de Newton, o sea la famosa Teoría general de la relatividad de Einstein. En la teoría de Newton, el hecho que todos los cuerpos caigan con igual rapidez es un aspecto contingente de la misma, pero es fundamental en la de Einstein. En primer lugar, Einstein sugiere que nuestro estado normal es más bien excepcional y quizás no sea el más fructífero para el análisis. Por *estado normal* se quiere significar nuestra existencia sobre la Tierra, donde experimentamos constantemente la acción de la gravedad y nunca nos hallamos en un estado de caída libre. Esta condición solo es posible por la solidez de la Tierra. Nos sentamos, nos paramos o nos apoyamos sobre objetos sólidos que, a su vez, están sostenidos por estructuras, tales como casas sobre la tierra sólida, que resisten la fuerza gravitacional. Por lo tanto, debemos considerar nuestro peso, no tanto como una consecuencia de la gravitación, como del hecho que estamos sobre una superficie sólida que nos sostiene contra la atracción gravitacional. Einstein observa que si no hubiera gravitación y nos halláramos en una nave espacial con los motores de sus cohetes encendidos con toda su potencia de modo que hubiera una aceleración constante, las condiciones imperantes en el interior de la nave espacial serían muy similares a las que estamos acostumbrados, pues todo objeto tiene inercia, lo que significa que es menester aplicarle una fuerza para acelerarlo. Así, en la nave espacial acelerada, todos los objetos tie-

nen peso y caen con igual rapidez si se retira su apoyo.

¿En qué se revela, pues, la verdadera naturaleza de la gravitación? Consideremos nuevamente la casilla en caída libre y supongamos que cae por un tubo que atraviesa la superficie de la Tierra y pasa por su centro. Dentro de la casilla habrá ausencia de peso, pero, como lo señala Einstein, si examinamos muy cuidadosamente las condiciones, hallaremos indicios de la gravitación de la Tierra. Consideremos dos partículas que están en reposo, en lados opuestos de la casilla, antes de que ésta comience a caer. Cada una de ellas cae libremente hacia el centro de la Tierra. Por lo tanto, en el momento en que la casilla pase por el centro, esas dos partículas chocarán dentro de ella. Hay, pues, una pizca de gravitación que no podemos eliminar dentro de una casilla en caída libre y que provoca el choque de dos partículas originalmente en reposo, en paredes opuestas, en el momento en que la casilla recorre el radio de la Tierra. A partir de este análisis Einstein construyó su nueva teoría de la gravitación. Casi todos sus resultados son los mismos que los de la teoría de Newton, pero hay unos pocos efectos muy pequeños que son diferentes. Las pruebas de observación están en favor de la teoría de Einstein y hablan en contra de la de Newton. Pero, matemáticamente, la teoría de la gravitación de Einstein es sumamente engorrosa. Sabemos que permite obtener la misma respuesta que la de Newton para todos los problemas prácticos, exceptuando uno o dos sumamente refinados. Por eso, en la práctica continuamos usando la teoría de Newton en todos los casos, excepto los mencionados, pues es más simple de manipular y ofrece las mismas conclusiones que la de Einstein, conclusiones que concuerdan muy bien con la observación.

Capítulo 10

Movimiento de los cuerpos celestes

Las consecuencias de la ley de gravitación pueden estudiarse mejor en el espacio. Aquí la gravitación aparece en una forma más simple que en ninguna otra parte. Sabemos que en la Tierra se ejercen también otras fuerzas que hacen difícil estudiar la gravitación aisladamente. Por ejemplo, la resistencia del aire hace que los objetos livianos, como las hojas, caigan mucho más lentamente que los pesados, como las piedras. Durante muchos siglos esta circunstancia impidió descubrir la ley hallada por Galileo, según la cual en ausencia de otras fuerzas, como la resistencia del aire, todos los cuerpos caen con igual velocidad. Cuando se examina la estructura de las estrellas, la gravitación es indudablemente de la mayor importancia. Pero, también en este caso actúan otras fuerzas, como la presión del gas y los efectos de radiación, que es necesario tomar en cuenta antes de sacar conclusiones acerca de la estructura estelar. Solamente cuando estudiamos los movimientos de los planetas y los satélites podemos tener un

LAMINAS

Lámina I. La expansión del universo puede inferirse de ésta y de otras observaciones similares. La columna de la izquierda muestra galaxias situadas a distancias diversas, fotografiadas todas con el mismo aumento. En las fotografías, las galaxias aparecen como objetos difusos, cuyo centro está en el medio de cada fotografía; las dos galaxias más lejanas se hallan indicadas por flechas, para poder identificarlas. Los otros objetos difusos de las fotografías son otras galaxias; los objetos más nítidos son estrellas cercanas a nosotros. A la derecha, se ven las fotografías de los espectros de aspecto difuso de las galaxias; estos espectros se extienden desde el azul, a la izquierda, hasta el rojo, a la derecha. Las líneas brillantes que se ven por encima y por debajo de cada espectro pertenecen a espectros de comparación producidos en el laboratorio. Si la fuente estuviera en reposo, el par de líneas oscuras que aparecen en el espectro de cada galaxia por encima de la punta de la flecha, estarían por encima del pie de ésta.

...ULOSA DEL ...MULO DE	DISTANCIA DE AÑOS LUZ	DESPLAZAMIENTO HACIA EL ROJO
VIRGO	4.500.000	1.220 Km POR SEGUNDO
...A MAYOR	600.000.000	14.880 Km POR SEGUNDO
...RONA BOREALIS	800.000.000	21.440 Km POR SEGUNDO
BOOTES	1.400.000.000	39.040 Km POR SEGUNDO
HYDRA	2.200.000.000	60.080 Km POR SEGUNDO

H+K

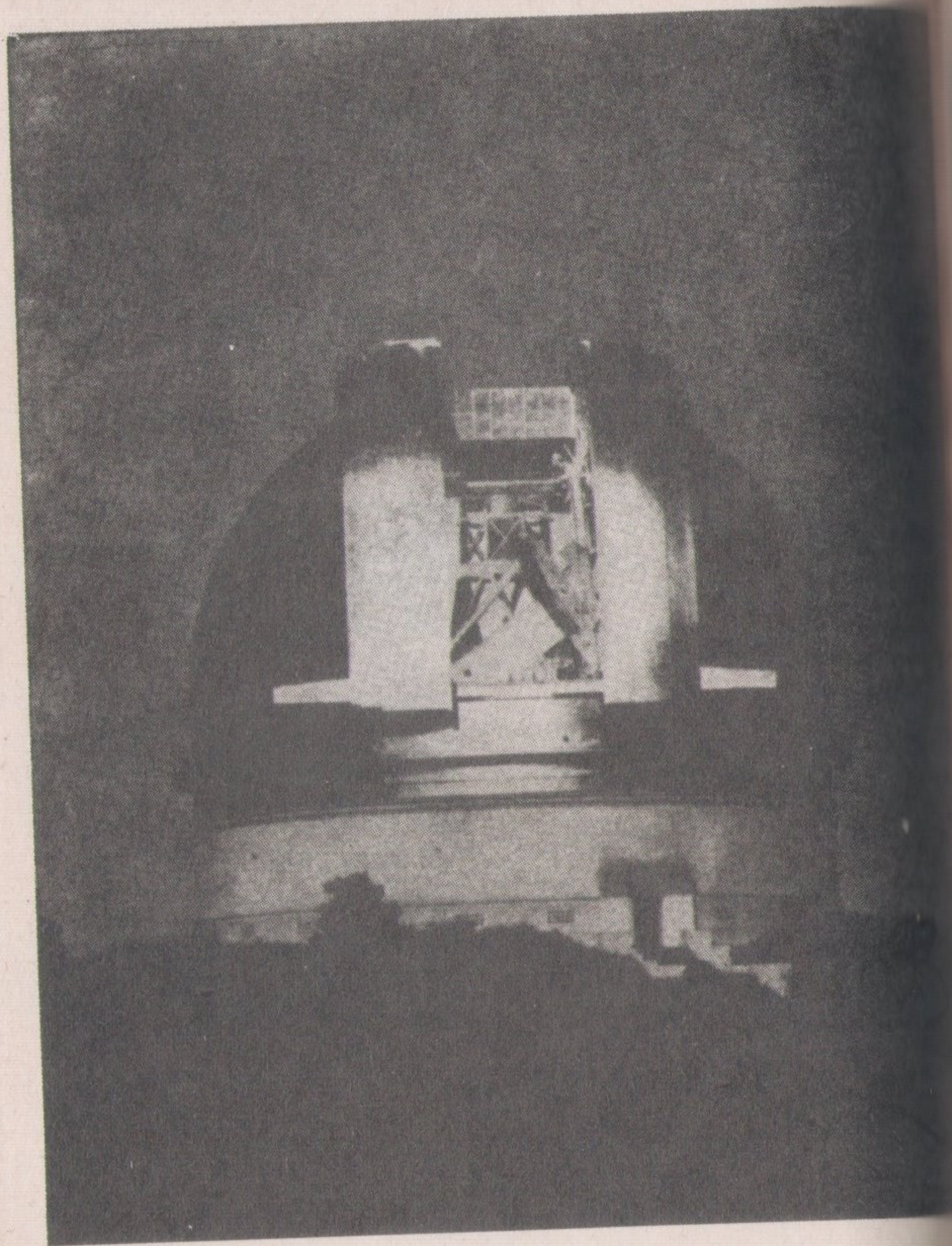


LÁMINA II. Vista del famoso Observatorio de Monte Palomar, en California, en la que aparece la cúpula del enorme telescopio de 5 metros.

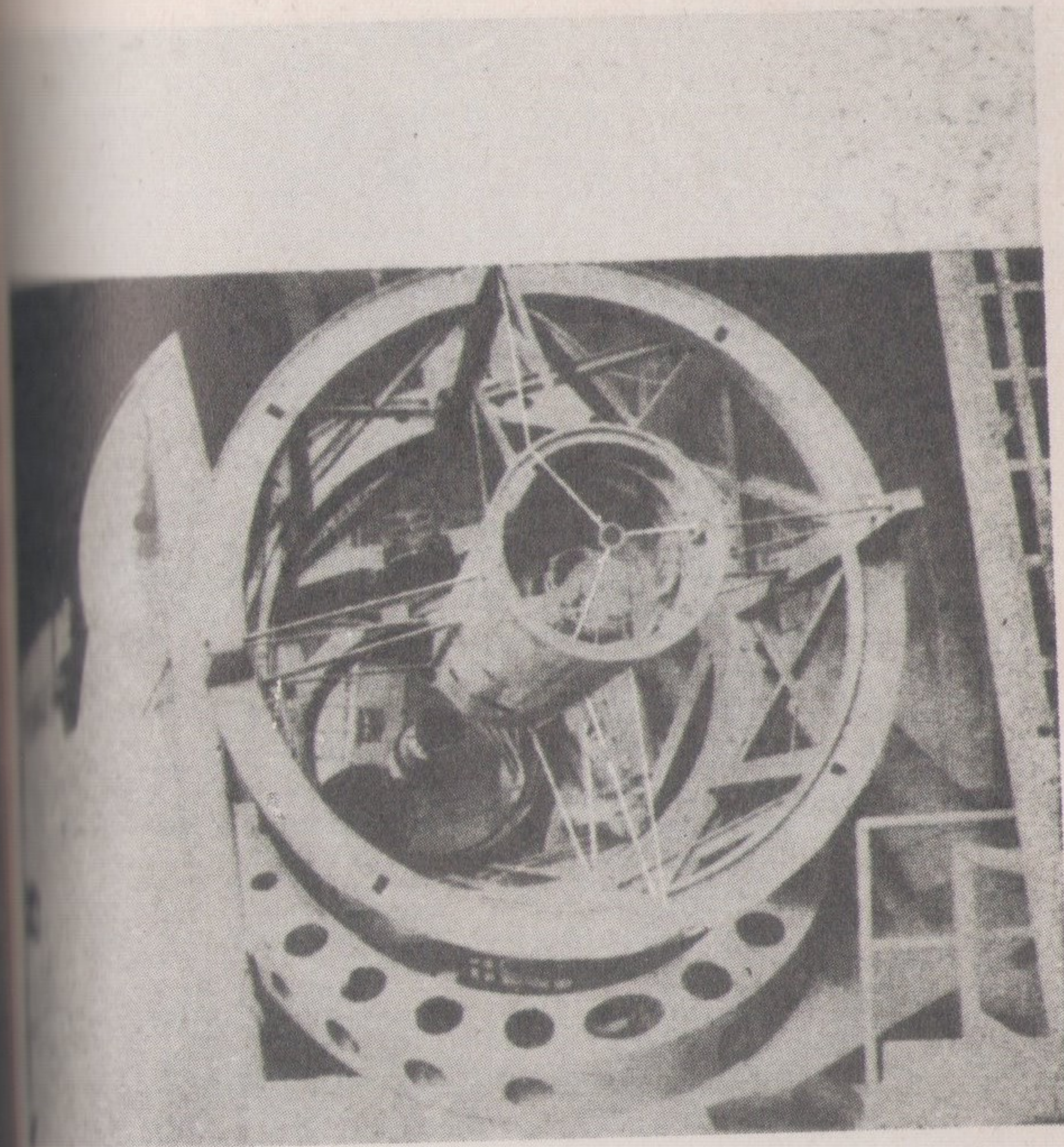


LÁMINA III. Fotografía tomada desde el exterior de la cúpula del telescopio Hale de 5 metros, de Monte Palomar. El observador se halla en la jaula del foco del gran espejo circular, que se encuentra más abajo.

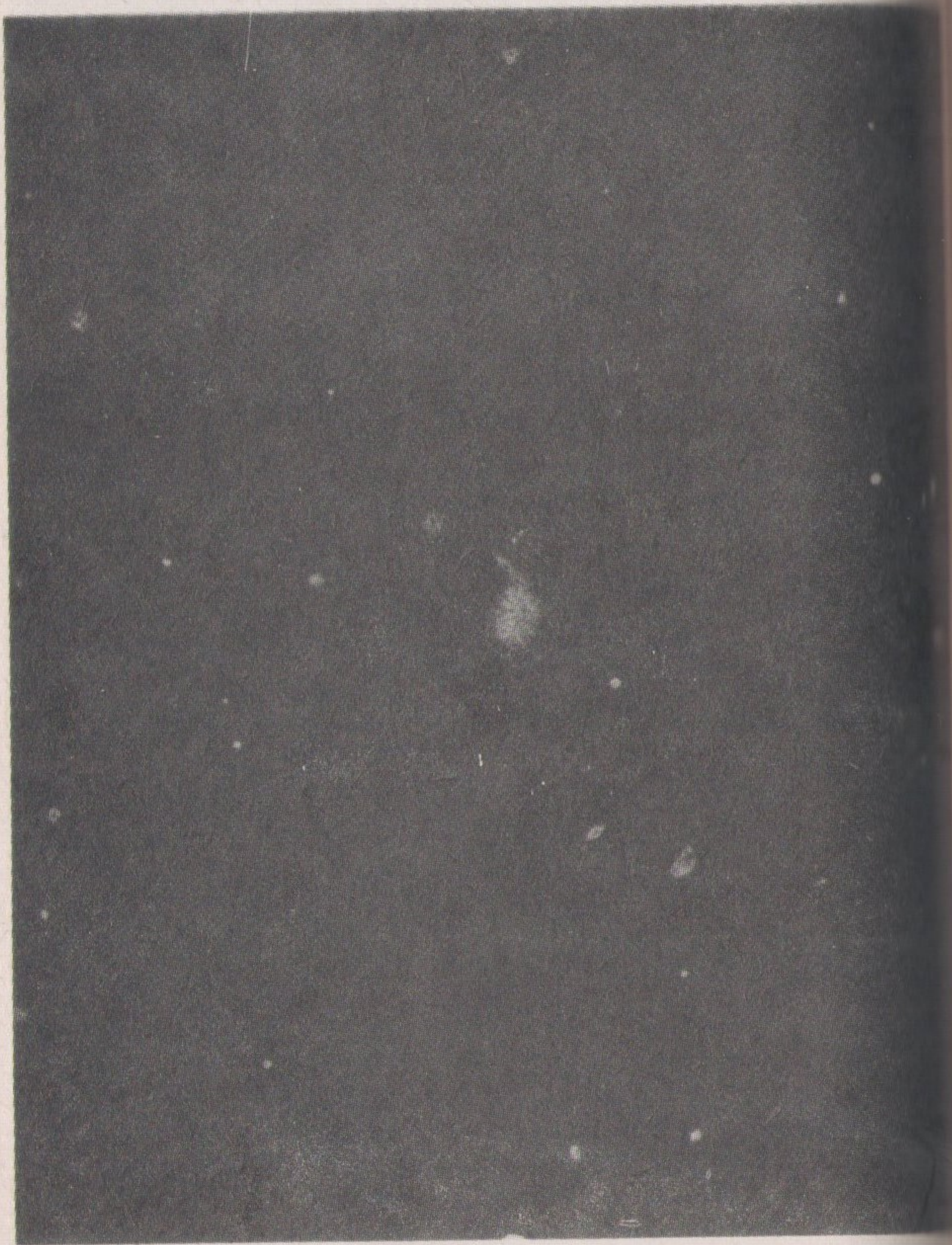


LÁMINA IV. Fotografía de un cúmulo de galaxias en Coma Berenices, situado a una distancia de unos 200 millones de años-luz. La mayoría de las galaxias aparecen en cúmulos similares.

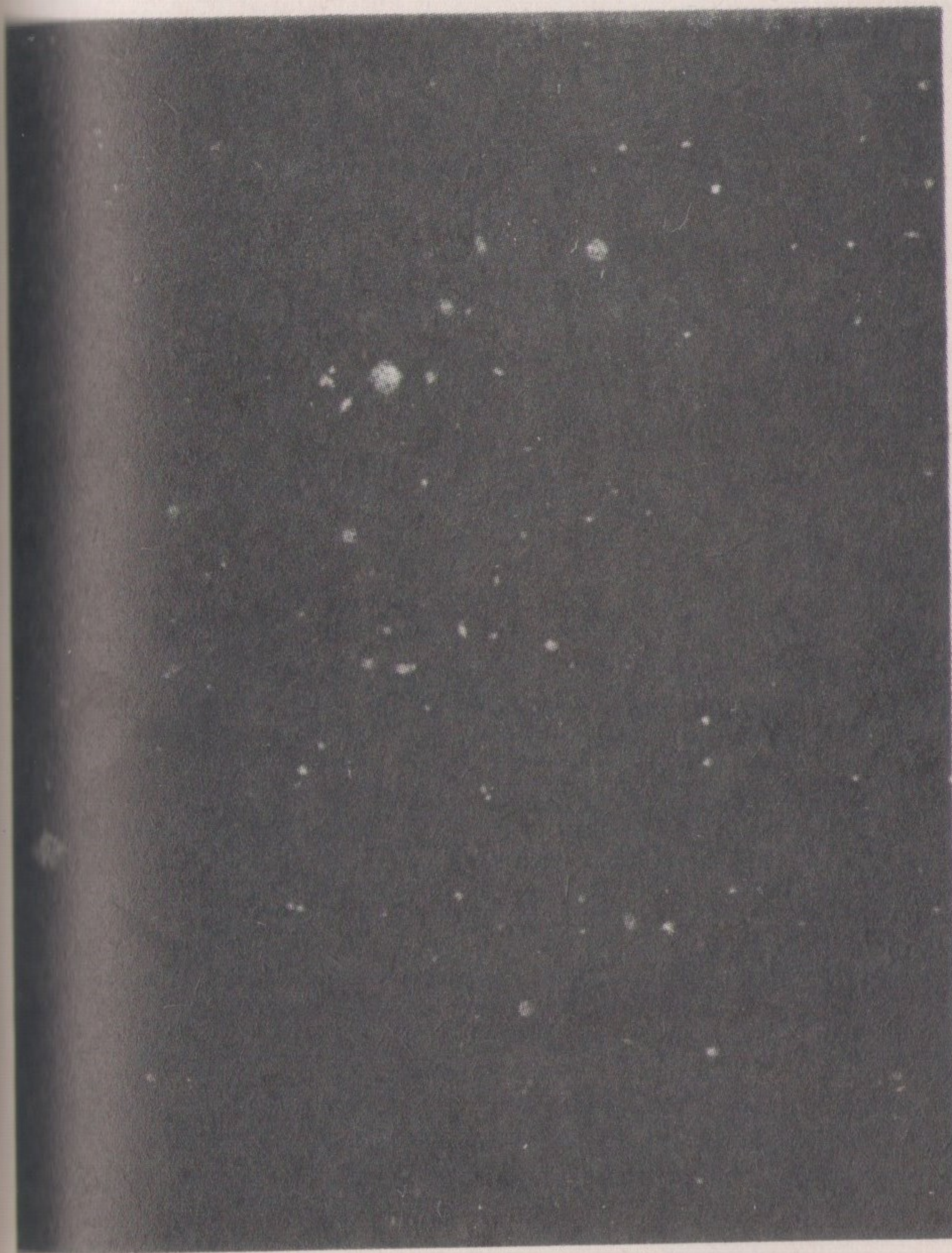


LÁMINA V. Fotografía de un cúmulo de galaxias en Corona Borealis, situado a unos 500 millones de años-luz de distancia. Varias de las galaxias son claramente visibles en la fotografía.



LÁMINA VI. Cúmulo de galaxias en Hydra, a 1.500 millones de años-luz de distancia. Los numerosos objetos difusos que aparecen aquí son galaxias que forman parte de un cúmulo. Los objetos más brillantes son estrellas cercanas a nosotros.

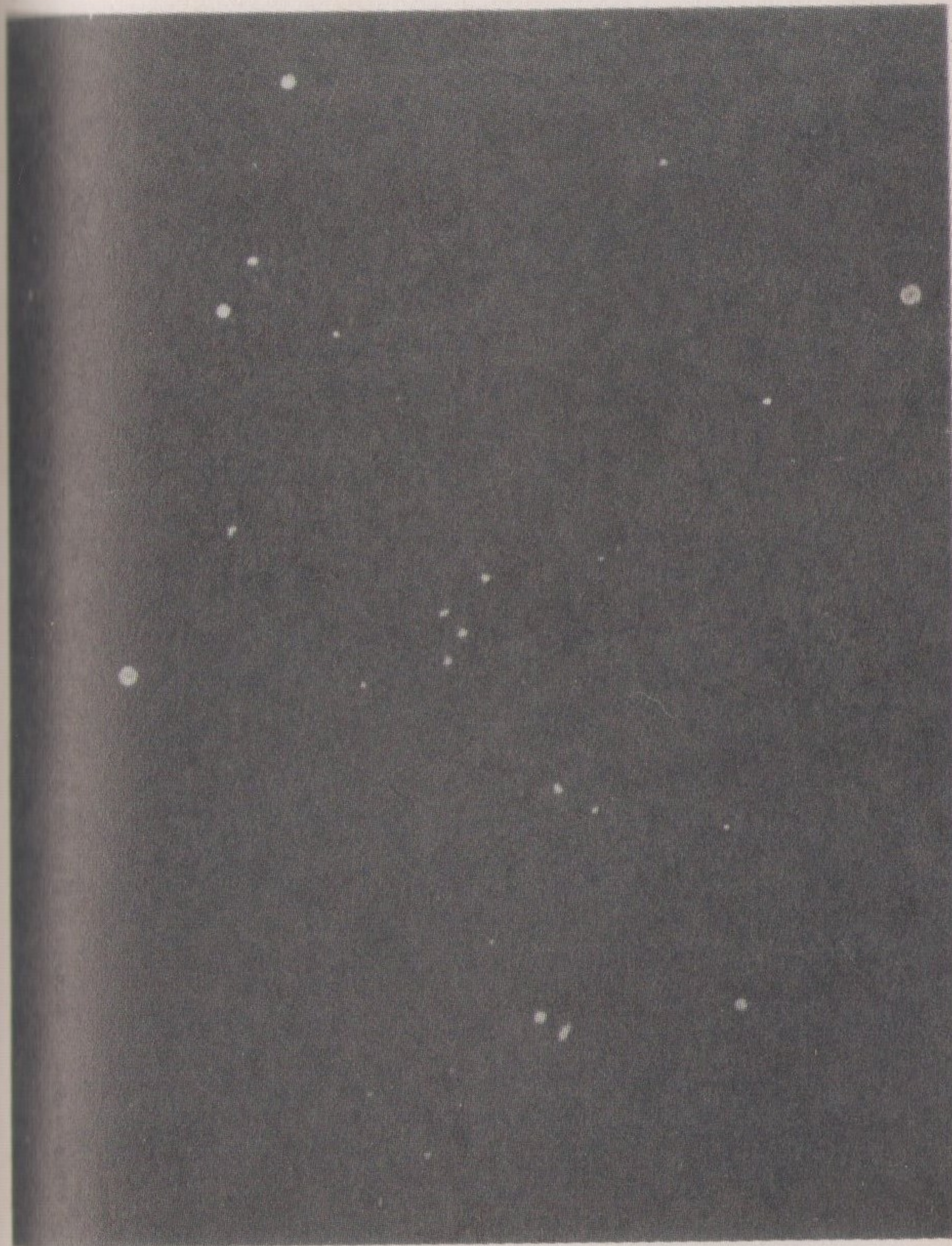


LÁMINA VII. Fotografía de un campo de galaxias débiles en la constelación de Piscis, situadas a una distancia de más de mil millones de años-luz.



Lámina VIII. Una galaxia espiral vista de lado. El anillo oscuro es una franja de polvo que oscurece la luz de las estrellas que están detrás de ella.



Lámina IX. Todavía hoy podemos observar los restos de una gran explosión que ocurrió en el año 1054. Esos restos constituyen la gran nube de gas luminosa conocida como La Nebulosa del Cangrejo, en Taurus.

UNA SUPERNOVA EN IC 4182

LÁMINA X. Una estrella brillante nueva aparece y luego se esfuma. En una galaxia cercana apareció repentinamente una estrella muy brillante. La fotografía superior (1937) la muestra en sus primeras etapas. Era tan brillante que solo se necesitó un tiempo de exposición muy corto (20 minutos) para tomarla, por lo cual aparecen en esa fotografía muy pocas estrellas. En la fotografía del medio (1938) aparece mucho más débil, a pesar de que se duplicó el tiempo de exposición (45 minutos). La fotografía de abajo (1942), tomada con una nueva duplicación del tiempo de exposición (85 minutos), no revela ningún rastro de la estrella, aunque, por mayor tiempo de exposición, aparecen muchos detalles de fondo que no muestran las otras fotografías.

a



b



c



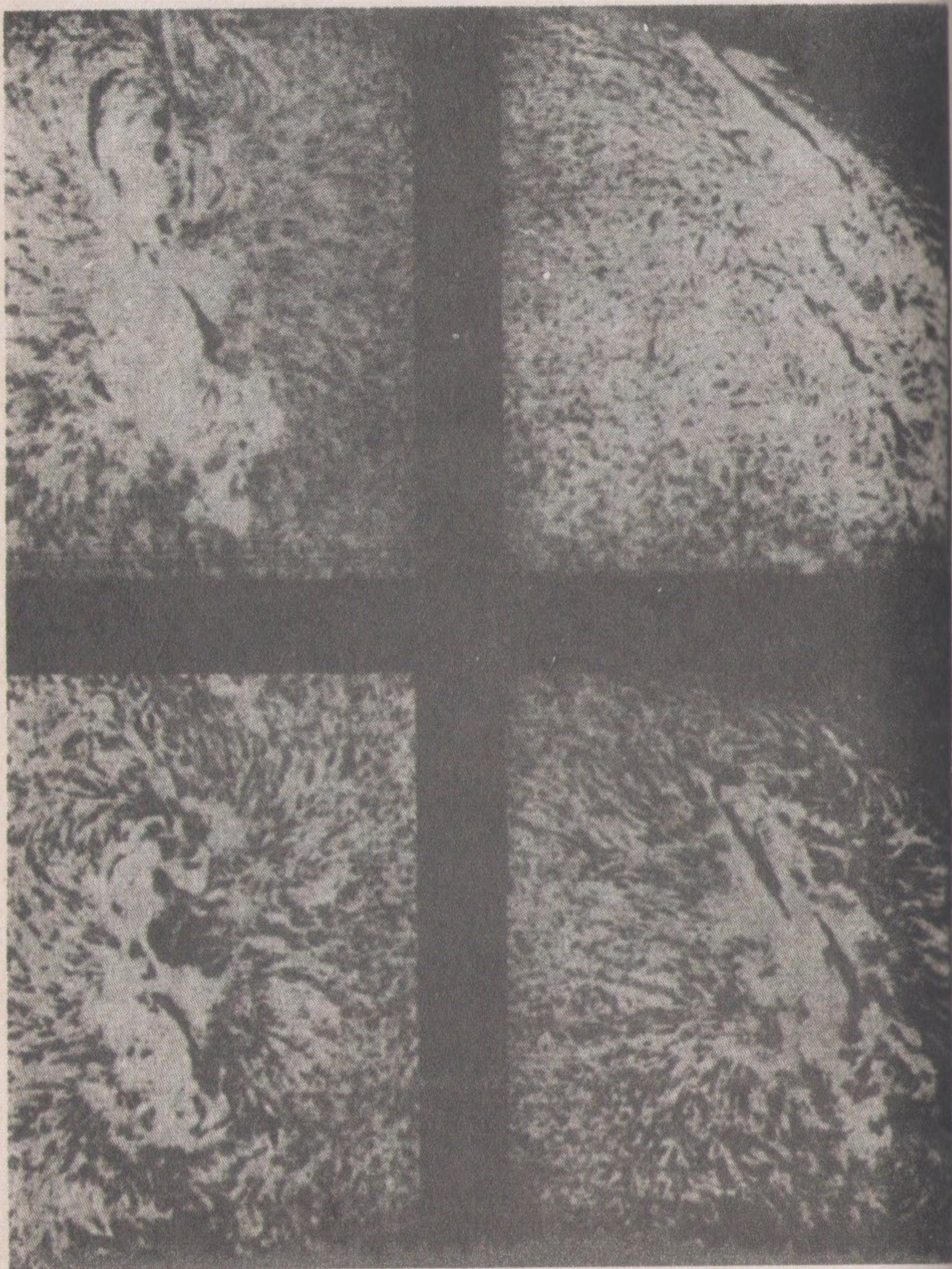


LÁMINA XI. En estas fotografías de la región sur-oeste del Sol, tomadas en agosto de 1915 a intervalos de dos días, se ve claramente el burbujeo de las capas de la superficie.

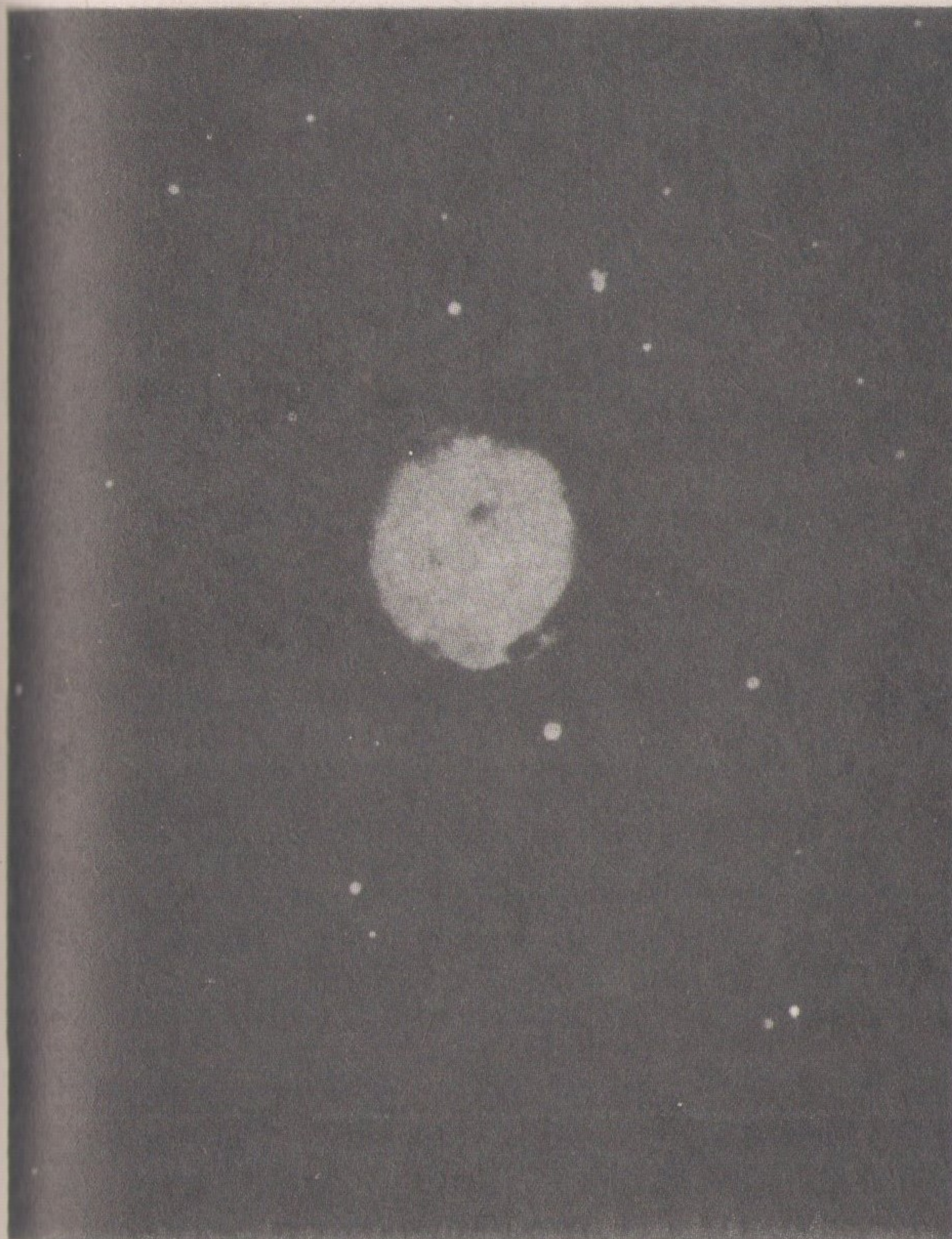


LÁMINA XII. La Nebulosa del Búho, en Ursa Major, es una masa esférica de gas iluminada principalmente por la luz de la estrella que hay en su centro.

razonable margen de seguridad de que no intervienen otras fuerzas de importancia más que la gravitación.

La fuerza del Sol

¿Qué dice, pues, la Ley de la gravitación de Newton acerca del movimiento de los cuerpos celestes? Ante todo, como ya hemos dicho, la atracción de un cuerpo esférico es igual a la de una partícula de la misma masa situada en el centro de la esfera. Si el cuerpo no es esférico, la atracción hacia el exterior es un poco diferente. Pero la diferencia entre ésta y la de un cuerpo esférico de la misma masa disminuye rápidamente a medida que nos alejamos del cuerpo. La forma de los planetas es casi esférica y las distancias entre ellos es tan grande comparada con sus diámetros, que podemos tratarlos como partículas. Además, los cálculos se simplifican mucho por el hecho que la masa del Sol es mucho mayor que la masa de cualquiera de los planetas. Así, aunque los distintos planetas se atraen entre sí, en lo esencial el movimiento de cada uno de ellos se debe al Sol únicamente; los otros planetas solo provocan desviaciones pequeñas de este movimiento. Puede demostrarse fácilmente que el movimiento de una partícula en el campo de atracción de un cuerpo masivo es una sección cónica, esto es, una elipse, una parábola o una hipérbola, en las que el cuerpo masivo ocupa uno de los focos.

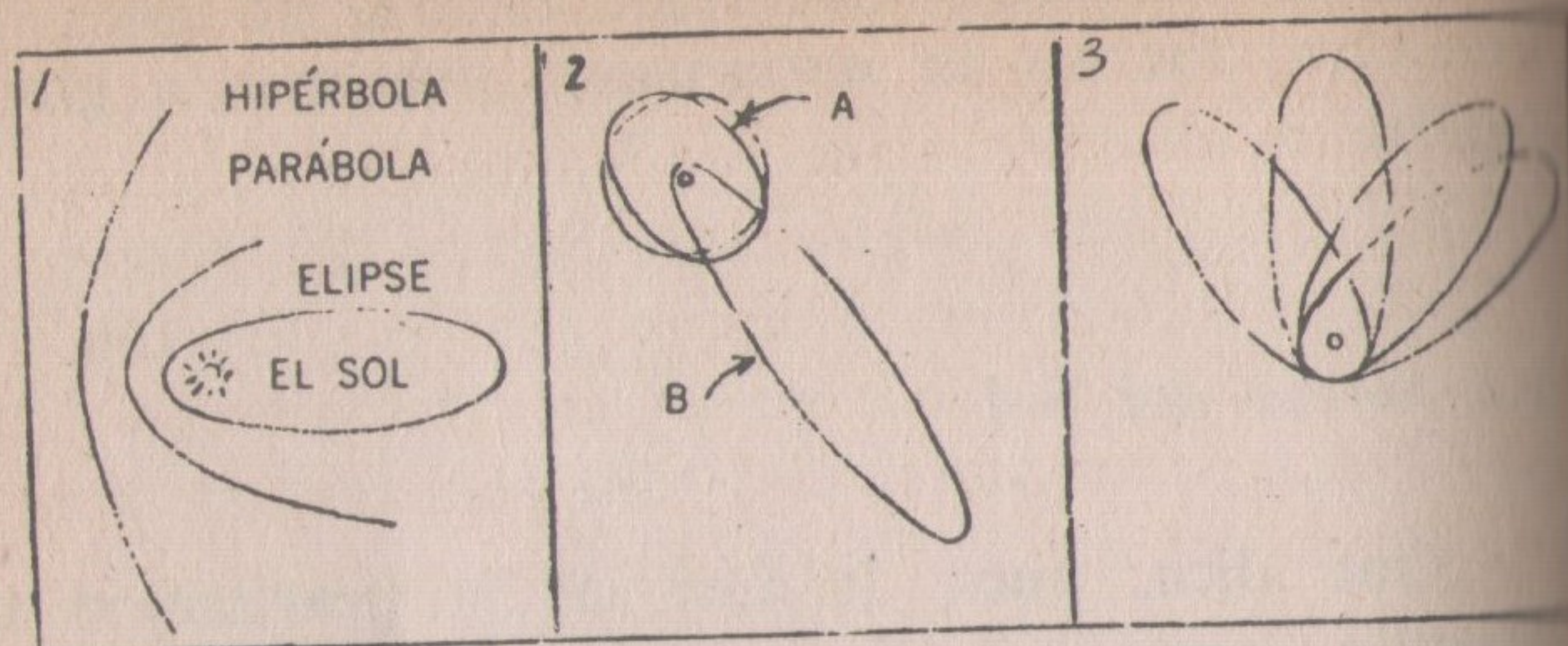


FIG. 38. En el espacio se puede estudiar mejor la ley de gravitación, pues sobre la Tierra intervienen muchas otras fuerzas, como la resistencia del aire, la fricción, etc. Cuando se analiza la estructura de las estrellas, es menester tomar en cuenta la presión de los gases y la radiación. Pero, cuando estudiamos el movimiento de cuerpos como los planetas y los satélites, adquirimos la certeza de que la gravitación es de fundamental importancia. Así, hallamos que el enorme tamaño del Sol comparado con el de los planetas hace que éstos y otros cuerpos sigan órbitas cuya forma es la de alguna sección cónica; es decir, órbitas elípticas, parabólicas o hiperbólicas. Un cuerpo cuya órbita es una elipse vuelve a recorrer una y otra vez su camino. Los cuerpos que siguen órbitas parabólicas o hiperbólicas solamente se aproximan al Sol una vez (2). La mayoría de los planetas se mueven en círculos o en elipses casi circulares. Muchos cometas se mueven en elipses sumamente alargadas. Las órbitas planetarias tienen formas como las de A. Las órbitas de los cometas tienen formas como las de B. De acuerdo con la relatividad general, las órbitas elípticas no se cierran por completo y rotan lentamente. En el dibujo se ha exagerado el efecto de esta rotación del eje mayor de la elipse. En el caso de un planeta de movimiento rápido, como Mercurio, la elipse cumple una rotación completa después de doce millones de vueltas.

La elipse es la más importante de ellas, pues es la única que da origen a un movimiento recurrente. Una partícula que sigue un camino parabólico o hiperbólico pasa una sola vez cerca del cuerpo y después se aleja para siempre. Las elipses son de formas diferentes. Pueden ser casi circulares o tener formas muy alargadas. Los planetas, en general, siguen órbitas casi circulares, es decir, sus órbitas son elipses que difieren muy poco de un círculo.

Si deseamos analizar el movimiento de los planetas teniendo en cuenta, no solamente la influencia del Sol, sino también la de cada uno de ellos sobre los otros, se llega a un problema de gran complejidad matemática. El caso más simple, aquél en el que solo se consideran dos planetas y el Sol, plantea el famoso problema de los tres cuerpos, en el cual se ha gastado una enorme cantidad de ingenio matemático. En el caso general, cuando los tres cuerpos tienen masas más o menos iguales, pueden darse órbitas de enorme variedad y complejidad; aún no se ha logrado una solución completa de este problema. Afortunadamente, no se la necesita para determinar el movimiento de los planetas, debido a la abrumadora superioridad de la masa del Sol, que supera a la de Júpiter —el cuerpo que le sigue en peso— en un factor de mil. En el complejo ámbito de la mecánica celeste, se comienza pues con las órbitas elípticas simples y luego se toman en consideración las desviaciones debidas a los otros planetas. Pero el problema es de gran complejidad matemática. Actualmente, se

usan cada vez más las modernas computadoras electrónicas para resolver los problemas que surgen.

En este punto, será conveniente mencionar una de las principales diferencias entre la teoría de la gravitación de Newton y la de Einstein. Si solo se considera el Sol y un planeta, la teoría de Newton permite deducir una elipse; pero la teoría de Einstein no da exactamente una elipse. En cada revolución la órbita es casi una elipse; pero la figura no se cierra completamente, de modo que, en períodos largos, la elipse gira alrededor del Sol. Este efecto había sido observado en el planeta más cercano al Sol, Mercurio, mucho antes de que Einstein formulara su teoría de la relatividad. Desde entonces, se ha confirmado la existencia de este efecto también en las órbitas de otros planetas. El movimiento del eje mayor de las elipses de las órbitas planetarias es uno de los principales resultados de observación que confirman la teoría de Einstein y no la de Newton.

Órbitas de los satélites

Los cometas también son miembros del sistema solar. También se mueven en órbitas elípticas, pero de gran excentricidad. En el caso de los llamados cometas de período largo, las elipses son enormemente alargadas.

Consideremos ahora el movimiento de los satélites. Surge aquí un problema un poco diferente. Las



FIG. 39. Si la Tierra fuera una esfera perfecta, el satélite seguiría una elipse fija. Pero, la Tierra presenta una pequeña dilatación en el Ecuador. Esto hace que el camino del satélite sea más complicado. Los anillos característicos del planeta Saturno pueden ser los restos de satélites que fueron destruidos por la atracción gravitacional del planeta.

lunas de los diversos planetas, inclusive la nuestra, a menudo se hallan tan cerca del planeta, que su órbita es afectada por las desviaciones de la forma esférica que presenta aquél. Por ejemplo, el movimiento de la Luna alrededor de la Tierra no es una elipse simple (aunque se aproxima a ella), sino una figura sumamente complicada, y para determinarla es menester recurrir a la matemática más abstrusa. Debido, presumiblemente, a su rotación y a la fuerza centrífuga que ésta origina, la Tierra es una esfera un poco aplanada. Presenta una dilatación alrededor del Ecuador. Podría parecer a primera vista que esto no tiene importancia, pues la diferencia entre el diámetro polar y el ecuatorial de la Tierra es apenas una fracción del 1 por ciento. Sin embargo, tiene

efectos sobre el movimiento de la Luna y es de enorme importancia para el movimiento de los satélites artificiales. Por ejemplo, si se considera una órbita como la del primer Sputnik, debe tomarse muy en

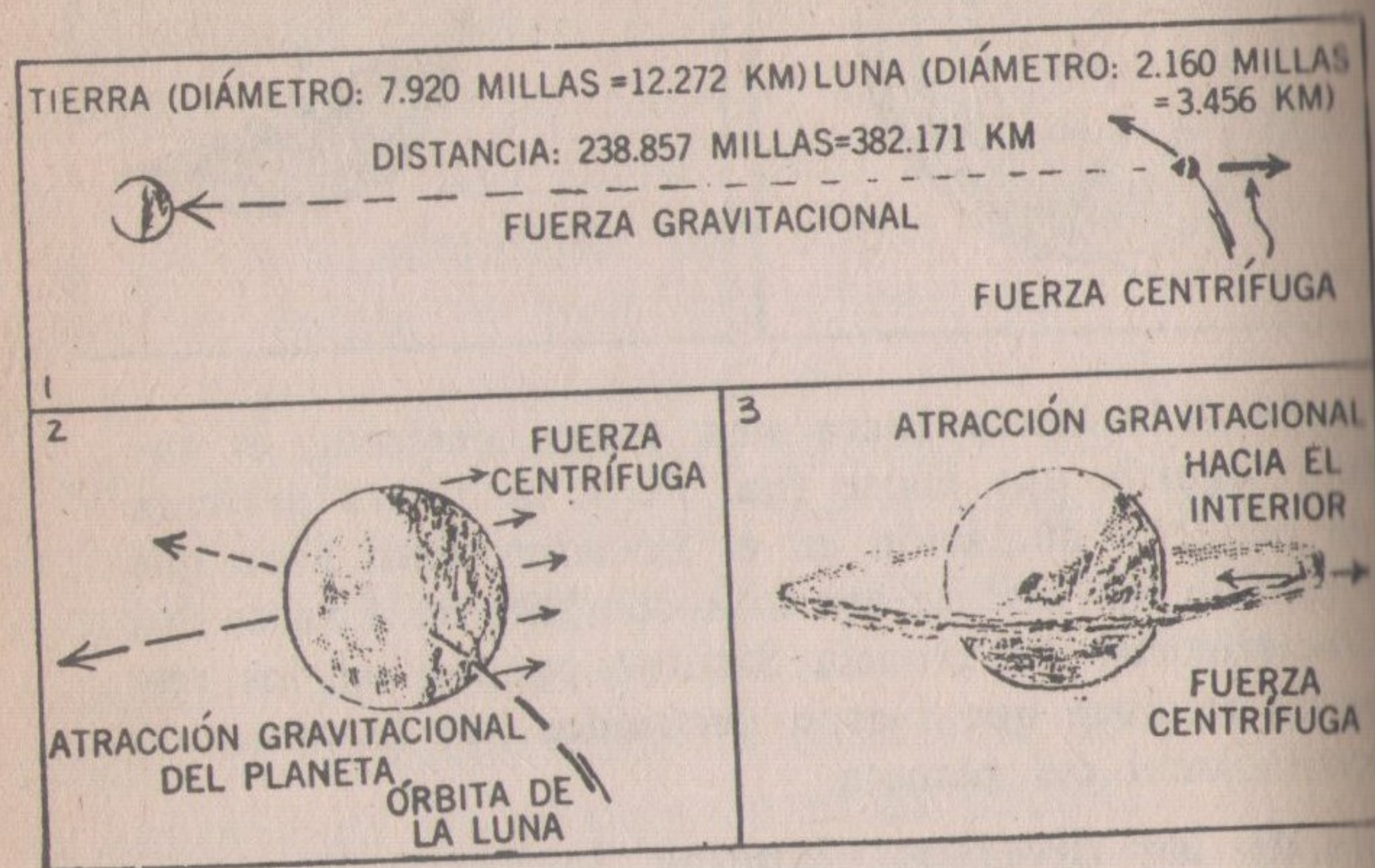


FIG. 40. Por qué la Luna presenta siempre la misma faz a la Tierra. La Luna está sujeta a la atracción gravitacional de la Tierra y a la fuerza centrífuga de su propio movimiento. La acción conjunta de estas fuerzas, ambas muy grandes, distiende un cuerpo como el de la Luna y eventualmente lo hace rotar de manera tal que siempre presenta la misma cara a la Tierra. A medida que la Luna se traslada en su órbita alrededor de la Tierra, el lado más alejado de nosotros se mueve más rápidamente (pues tiene que hacer un recorrido mayor) que el lado interior (visible para nosotros), de modo que el lado exterior experimenta una mayor fuerza centrífuga. Si un satélite (como la Luna) se aproxima demasiado al astro central, la atracción gravitacional de éste lo deforma y lo despedaza. Los restos del satélite forman entonces un anillo de pequeñas partículas alrededor del planeta.

cuenta la forma de la Tierra. Si la Tierra fuera una esfera, el satélite se movería en una órbita elíptica alrededor de la Tierra y el plano de esta órbita no revestiría ninguna importancia. Sería lo mismo que el satélite circulara alrededor del Ecuador, o fuera del Polo Norte al Ecuador o al Polo Sur y volviera, o siguiera cualquier otra inclinación intermedia. El Sputnik I tenía de hecho una órbita que se extendía hasta 60° al Norte y 60° al Sur. En tal órbita, el efecto del abultamiento ecuatorial de la Tierra es muy marcado y hace que toda la elipse gire alrededor de la Tierra. Por eso, la órbita del satélite no describirá una curva fija entre las estrellas del cielo nocturno, sino que atravesará toda una faja de la esfera celeste.

Este razonamiento puede invertirse. No es fácil determinar desde la superficie la figura exacta de la Tierra. Además, ésta no nos dice exactamente cuál es el campo gravitacional de la Tierra porque éste depende también de la distribución de la densidad en función de la profundidad. Pero, mediante el estudio del movimiento de los satélites artificiales, especialmente de los Sputniks y Vanguards, ha sido posible conocer la forma de la Tierra y la variación de la densidad mejor de lo que nunca se había logrado antes. Al considerar el movimiento de un satélite natural, debemos tomar en cuenta la circunstancia que tanto el satélite como el planeta constituyen cuerpos extensos, es decir, que no son partículas. Puesto que la parte del satélite más cercana al planeta es la que experimentará mayor fuer-

za de atracción, mientras que la parte más alejada se moverá con la mayor velocidad en la órbita y, por consiguiente, experimentará también la mayor fuerza centrífuga, se infiere que se establecen grandes tensiones en el interior de una luna. En el caso de nuestra Luna, esas tensiones han dado como resultado el conocido hecho que siempre presenta la misma cara a la Tierra. Hay un ligero balanceo en el movimiento de la Luna, como resultado del cual se ha podido conocer unas cuatro séptimas partes de su superficie. La reciente y espectacular hazaña del Lunik III de fotografiar la cara opuesta de la Luna ha sido justamente celebrada como una gran realización científica.

Si una luna se acerca mucho a su planeta paterno, las tensiones que se forman en ella son tan tremendas, que pueden originar rupturas y la formación de nubes de polvo. Esto es lo que, al parecer, ocurrió con una o más lunas de Saturno, y se presume que los famosos anillos de Saturno se formaron de esta manera. Con el tiempo, las partículas de polvo habrían chocado unas con otras y, eventualmente, esto las habría hecho seguir órbitas circulares hasta rodear por completo al planeta en un plano. Pero su movimiento debe de haber sido perturbado por los otros satélites, que Saturno tiene en respetable número. La existencia de otros satélites crea senderos prohibidos, por los que no pueden circular los restos polvorientos de los satélites interiores. De este modo podemos explicar la divisiones en los anillos de Saturno y las sendas oscuras que separan los anillos circulares.

Velocidad de los meteoros

Todos conocemos las estrellas fugaces o meteoros. Constituyen un hermoso espectáculo y en años recientes han sido estudiadas cada vez más, tanto por medios ópticos como radiales. Están formados por partículas, por lo general muy pequeñas, que entran en la atmósfera de la Tierra a gran velocidad y se queman rápidamente, con lo que adoptan el conocido aspecto de bolas de fuego. Algunos enjambres de meteoros son periódicos y reaparecen cada año. Otros son esporádicos. Los meteoros que vuelven a aparecer son, evidentemente, miembros de nuestro sistema solar. Tienen órbitas alrededor del Sol que lleva a ciertos grupos de ellos a introducirse en la atmósfera de la Tierra toda vez que ésta se encuentra, en su traslación alrededor del Sol, en el lugar apropiado para que eso se produzca. Respecto de los meteoros esporádicos la situación no es tan obvia. Pueden ser miembros del sistema solar o pueden provenir de regiones más lejanas. La mayoría de los miembros del sistema solar (pero no los cometas de período largo) se mueven en el plano de la eclíptica, o cerca de él. Pacientes observaciones han demostrado que la mayoría de los meteoros, si no todos, se mueven también dentro de este plano, aproximadamente, lo cual es una buena evidencia de que son miembros de

nuestro sistema solar. Otra prueba de esto la suministran sus velocidades. Si sus órbitas son elípticas, sus velocidades no pueden ser mayores que 26 millas por segundo. Aun cuando se movieran en sentido opuesto al del movimiento de la Tierra en su órbita (cuya velocidad es de 30 kilómetros por segundo), la velocidad aparente de aquéllos no podría pasar de 72 kilómetros por segundo. En cambio, si provinieran del espacio exterior su velocidad tendría que ser mayor de 42 kilómetros por segundo en sus órbitas hiperbólicas o parabólicas. Por esto presenta tanto interés saber si hay meteoros cuya velocidad respecto de la Tierra pase de 72 kilómetros por segundo. Actualmente, las observaciones indican claramente que no hay tales meteoros, o a lo sumo, los hay solamente en número ínfimo. Al parecer, a nuestro sistema solar no llegan del espacio exterior visitantes de esta clase.

Gravitación y luz

Hay otro problema de las órbitas gravitacionales que se relaciona con el movimiento de la luz. En nuestra experiencia ordinaria consideramos la luz como algo que no tiene masa, pero en el lenguaje más refinado de la física moderna, esta afirmación es de dudosa validez. Se plantea, pues, la cuestión de saber si la luz cae en un campo gravitacional como caen los objetos materiales. La teoría de Newton no suministra una respuesta clara a esta

cuestión. En ella, o bien la luz no es afectada para nada por la gravitación, o bien puede ser afectada en una medida muy pequeña. La teoría de Einstein da una respuesta inequívoca a este problema: la

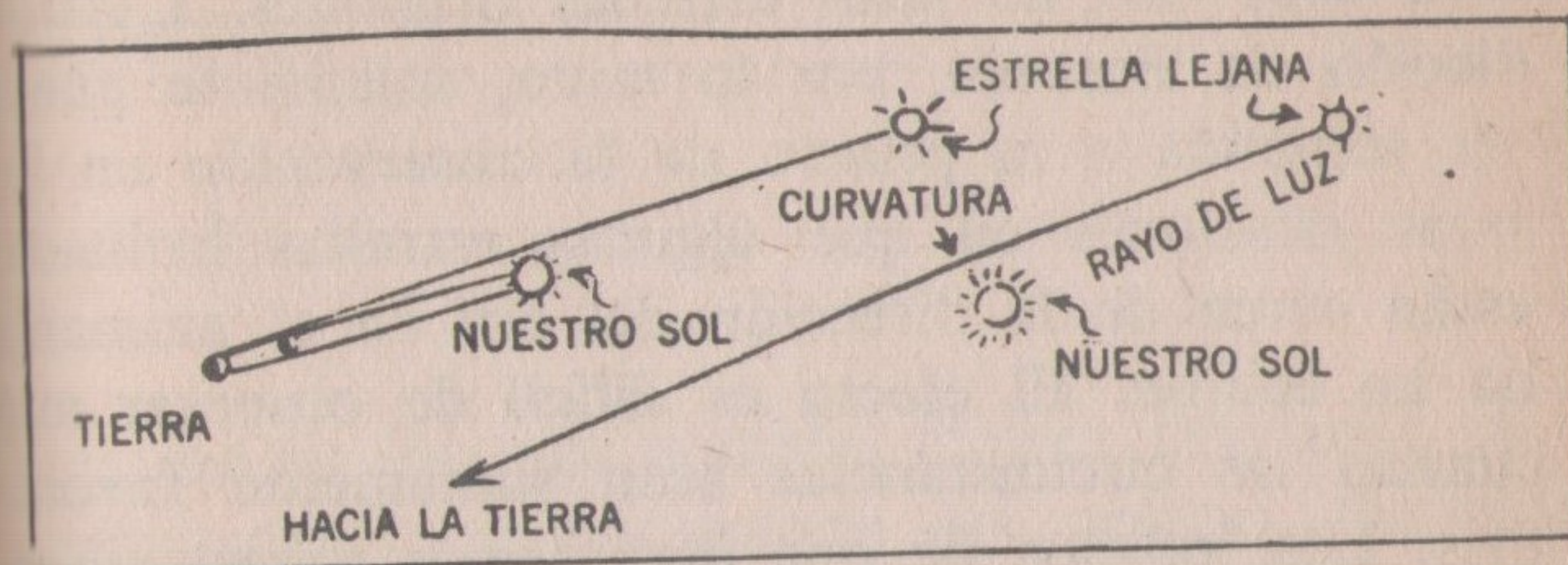


FIG. 41. Einstein halló que, en la vecindad del Sol, un rayo de luz de una estrella lejana debe curvarse ligeramente. Solo podemos observar esa desviación cuando la Luna eclipsa al Sol.

luz cae. Si embargo, como se mueve tan velozmente, cae muy poco. Esta caída de la luz debe manifestarse de manera más perceptible en la luz que pasa muy cerca de un cuerpo de gran masa. En nuestra vecindad, esto solo puede observarse en el caso de un rayo de luz que pase muy cerca del Sol. Según la teoría de Einstein, un rayo de luz que roce la superficie del Sol debe desviarse en un pequeño ángulo (un poco menos de dos segundos de arco) por la acción del campo gravitacional del astro. Según la teoría de Newton, el efecto sería a lo sumo la mitad del anterior. Es sumamente difícil observar una desviación tan pequeña en un rayo de luz. La única manera de lograrlo sería observando las estrellas que están más allá del Sol, lo que es impo-

sible durante el día. Debemos esperar que se produzca un eclipse de Sol para poder observar este efecto. Y aun durante un eclipse no hay toda la oscuridad necesaria. Por eso, es casi imposible ver otra cosa que no sean estrellas brillantes. La predicción de Einstein, por lo tanto, solamente puede ser sometida a la prueba de la observación en las raras ocasiones en que algunas estrellas brillantes están cerca de la dirección del Sol en el momento de un eclipse. El efecto es difícil de observar aun cuando las circunstancias sean sumamente favorables. Los indicios de que disponemos parecen confirmar la teoría de Einstein, pero sería prematuro considerar concluyentes estos resultados.

Capítulo 11

Mareas

Uno de los más notables efectos derivados de la gravitación son las mareas del océano, fenómeno muy familiar para todos nosotros. Aunque mucha gente sabe que la Luna tiene alguna relación con las mareas, no es muy obvio para todos por qué hay dos mareas por día y la Luna solo surge una vez por día. Se necesita un análisis minucioso, ya esbozado brevemente en el capítulo anterior, para explicar cómo actúan las fuerzas que originan las mareas.

Cuando dos cuerpos como la Tierra y la Luna se mueven bajo la acción gravitacional de uno sobre el otro, ambos lo hacen alrededor del punto conocido como el centro común de masa. A fin de determinar este punto, trazamos una línea que una los centros de los dos cuerpos y la dividimos proporcionalmente a sus masas. El punto así hallado es el centro de masa. Si los dos cuerpos tienen masas iguales, el centro de masa divide la línea que une los centros de los cuerpos en partes iguales, es decir, está en el medio. Si un cuerpo tiene mucha más

masa que el otro, el centro común de masa se halla mucho más cerca del cuerpo que tiene mayor masa. La Tierra es unas 80 veces más masiva que la Luna y, por consiguiente, el centro común de masa está más cerca del centro de la Tierra; en realidad, está dentro mismo del cuerpo de la Tierra; pero esto no afecta a nuestro examen.

Fuerzas entre estrellas dobles

Si consideramos una estrella doble, con dos estrellas de igual masa que se mueven circularmente alrededor del centro de masa, tendremos el sistema más simple que se pueda imaginar. La fuerza gravitacional tiende a acercar a las dos estrellas, mientras que la fuerza centrífuga tiende a separarlas. Si consideramos una de estas estrellas, vemos que *toda* ella es atraída por la otra, pero la parte más cercana a ésta será atraída en mayor medida que la parte más alejada, puesto que la gravitación disminuye con el alejamiento por la ley del inverso del cuadrado de la distancia. Del mismo modo, puesto que la estrella se desplaza alrededor del centro común de masa en su órbita circular, toda la estrella experimentará la acción de la fuerza centrífuga. Pero la parte más cercana a la otra estrella se moverá con menor velocidad y por lo tanto experimentará menos fuerza centrífuga; en cambio, la parte más alejada se moverá a mayor velocidad y experimentará el máximo de fuerza centrífuga. Así,

el lado de la estrella más cercano a la compañera de ésta sufre el máximo de atracción gravitacional y el mínimo de fuerza centrífuga, a la par que en el otro lado ocurre lo contrario.

En promedio, en toda la estrella, la fuerza centrífuga y la fuerza gravitacional se equilibran exactamente. Por eso la estrella permanece en su órbita. Pero, si bien las dos fuerzas se equilibran cuan-

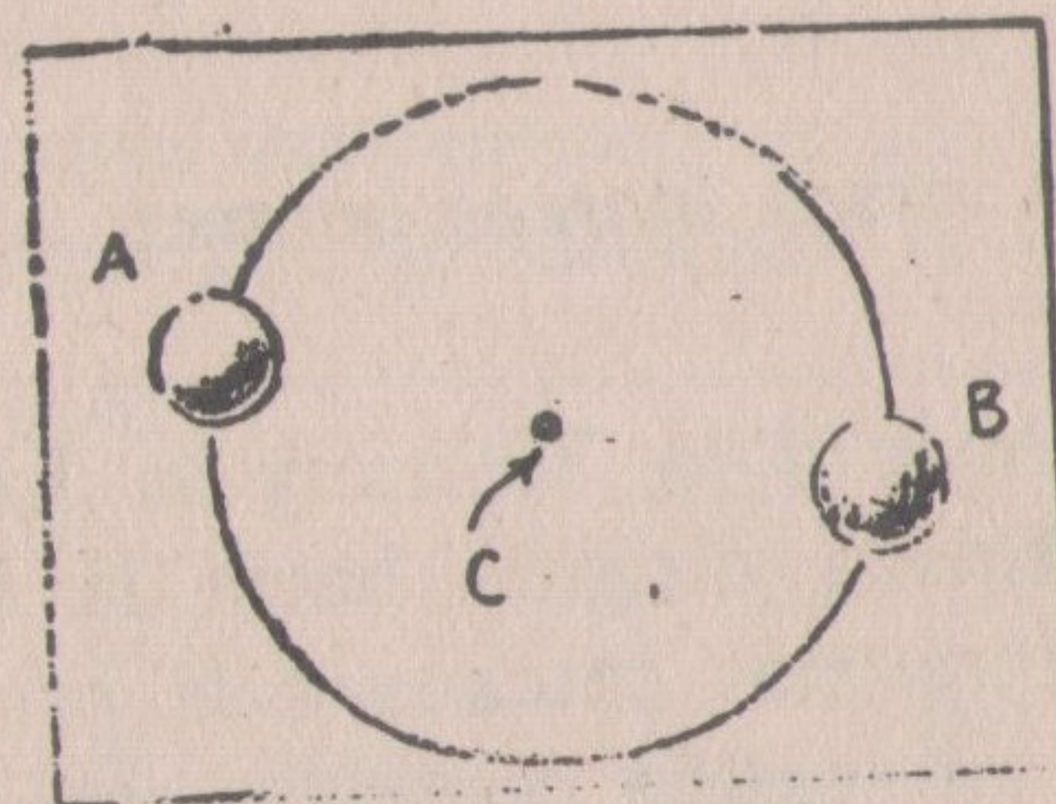


FIG. 42. Cuando dos cuerpos de igual masa (A y B) giran uno alrededor del otro, describen el mismo círculo. Si sus masas son diferentes, el cuerpo mayor describe un círculo menor. El centro del círculo, C, que está a igual distancia de A y de B, permanece en reposo.

do se las promedia para toda la estrella, es indudable que en la parte más cercana a la otra estrella la gravitación es mayor que la fuerza centrífuga, mientras que en la parte opuesta sucede lo contrario. Por consiguiente, en definitiva predomina una fuerza hacia la otra estrella en la parte más cercana a ésta y predomina una fuerza que tiende a alejarla en el lado más lejano. Estas fuerzas, que resultan de

una ausencia local de equilibrio entre la gravitación y la fuerza centrífuga, reciben el nombre de fuerzas de marea. Como se habrá observado, derivan de la diferencia entre la gravitación y la fuerza centrífuga a través de la estrella, no de los valores absolutos de las fuerzas. Cuando se analiza este fenómeno en detalle, resulta que estas fuerzas de marea no varían según el inverso del cuadrado de la distancia, sino según el inverso del cubo de la distancia.

Mareas solares versus *mareas lunares*

Volviendo ahora a la Tierra y la Luna, resulta que hay una fuerza dirigida hacia la Luna en la parte de la Tierra más cercana a la primera y una fuerza dirigida en sentido contrario en la parte más alejada. Por ello, si toda la Tierra estuviera cubierta uniformemente por el océano, el nivel del agua se elevaría tanto en la parte más cercana a la Luna como en la parte opuesta y disminuiría en el resto de la Tierra. Es posible calcular en cuánto se elevaría el mar y el resultado es la cifra notablemente baja de alrededor de 40 centímetros. Pero, la Tierra no solamente sufre la atracción gravitacional de la Luna, sino también la del Sol, que es mucho más importante aún que la primera. El volumen del Sol es mucho mayor que el de la Luna y su masa es casi 30 millones de veces la de ésta, pero se encuentra unas 400 veces más alejado de la Tierra que la Luna. Las fuerzas de marea, como ya hemos

dicho, varían con el inverso del cubo de la distancia y cuando hacemos los cálculos correspondientes resulta que el efecto de marea del Sol solo es la mitad del de la Luna. Es decir que en una Tierra uniformemente cubierta por el océano, éste ascendería unos 20 centímetros por la acción del Sol y 40 centímetros por la acción de la Luna.

¿Cómo se combinan las mareas debidas al Sol y las debidas a la Luna? Si el Sol y la Luna se hallan en la misma dirección, las mareas altas debidas a los dos cuerpos aparecerán en los mismos lugares y, por consiguiente, se sumarán; la marea alta solar

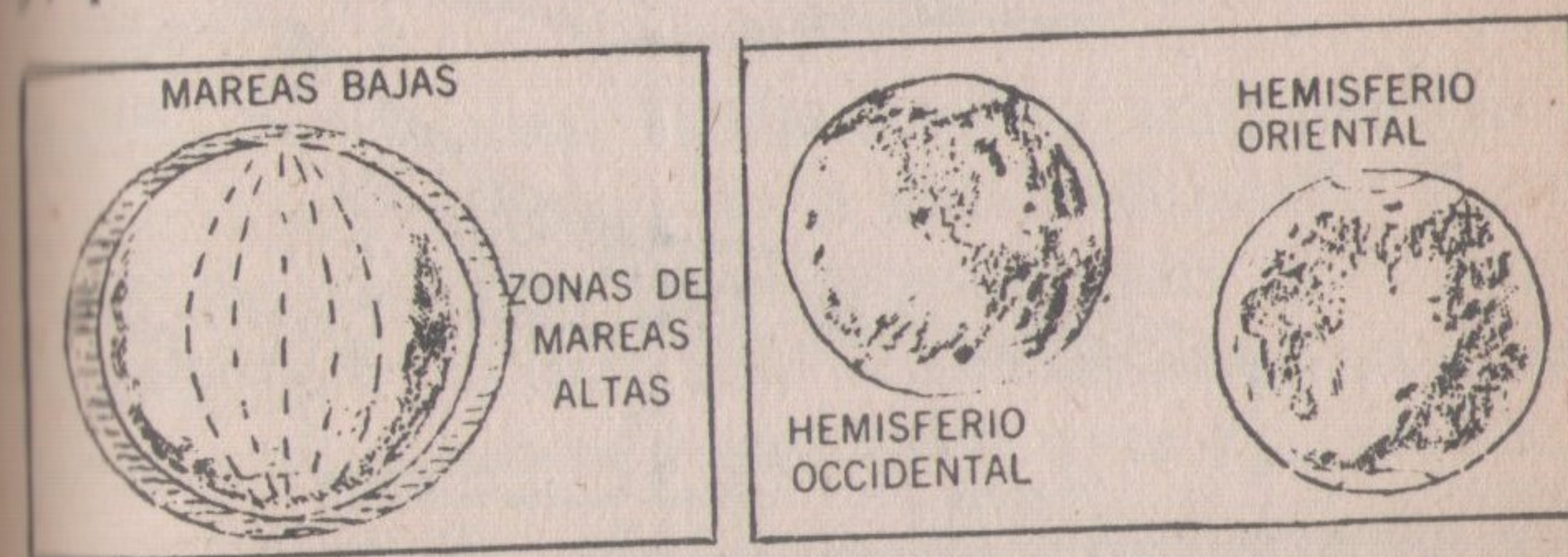


FIG. 43. ¿Qué ocurriría si toda la superficie de la Tierra estuviera cubierta por las aguas? Se producirían dos grandes dilataciones debidas a las mareas, una en la parte más cercana a la Luna y la otra en el lado opuesto. A la derecha, la parte de la Tierra más próxima a la Luna es la zona de mareas altas, al mismo tiempo que el lado opuesto de la Tierra también experimenta una marea alta por la rotación de la Tierra alrededor del centro de gravedad común. La línea punteada indica la región de mareas bajas. Los dibujos de los hemisferios Occidental y Oriental muestran que el agua, que cubre las tres cuartas partes de la superficie del planeta, se halla limitada por las masas de tierra. Este hecho modifica mucho las mareas.

estaría encima de la lunar, por decir así. Si el Sol y la Luna se hallan en direcciones opuestas, las mareas también se sumarán, pues la marea alta debida al Sol, en la parte de la Tierra más cerca de él, se producirá en el mismo lugar que la marea alta debida a la Luna en la parte de la Tierra más alejada de la Luna. Luego, cuando el Sol y la Luna están en la misma dirección o en direcciones opuestas, las dos mareas aparecerán en los mismos lugares y se sumarán, formando una marea de 60 centí-

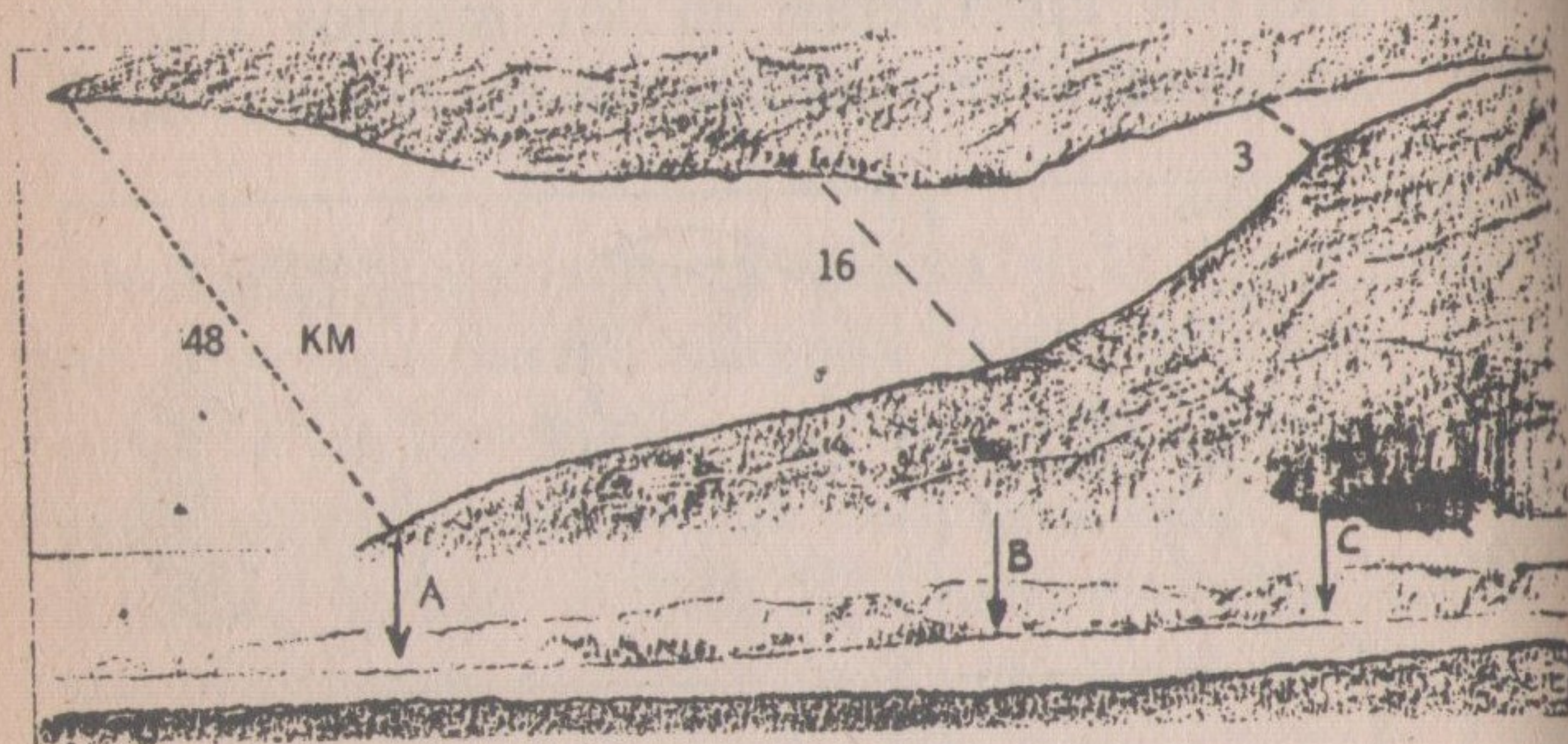


FIG. 44. Cómo sube la marea en una bahía que se va estrechando. Supongamos que en el punto A la bahía tiene 48 kilómetros de ancho y que se desplaza hacia la tierra una masa de agua de un metro y medio de alto. En el momento en que esta ola llega al punto B, cuyo ancho solo es la tercera parte del anterior, la ola tiene 4 metros y medio de alto, y si no fuera por la fricción que se produce contra el fondo de la bahía, la ola de marea continuaría elevando su altura a medida que penetra en ella. (La parte de abajo del dibujo es un corte trasversal del contorno del fondo y del contorno de la onda de marea).

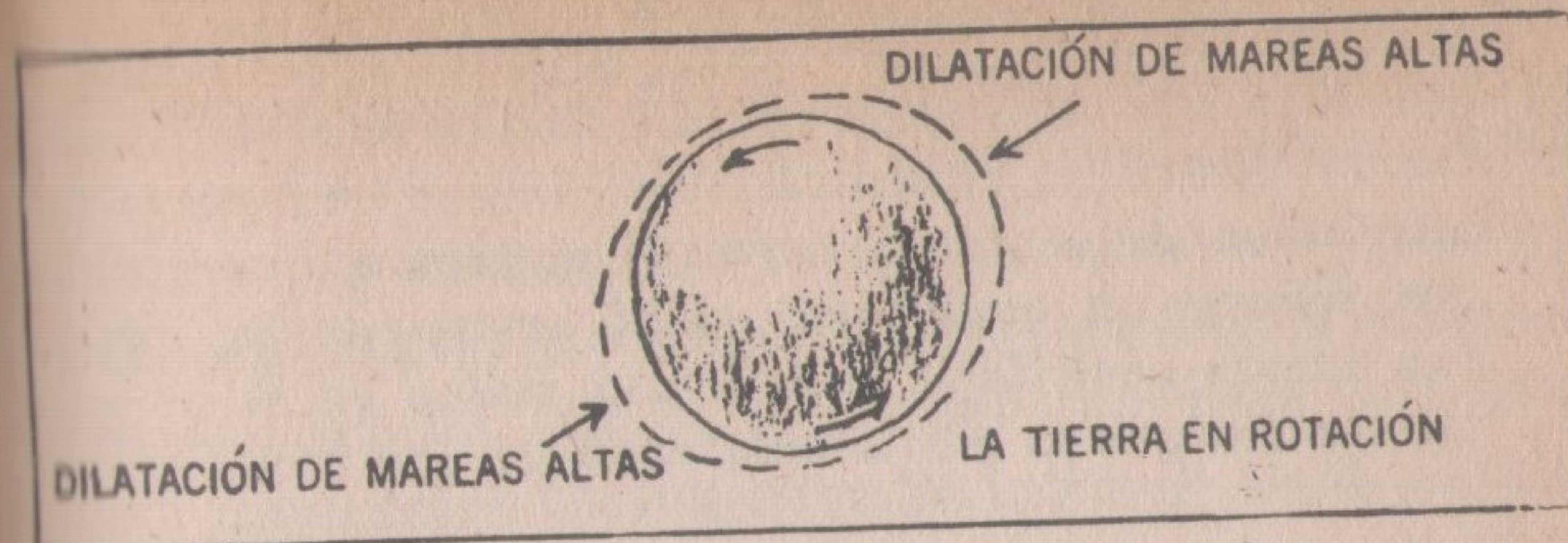


FIG. 45. Mientras la Tierra gira, la Luna retarda los abultamientos originados por las mareas. De este modo, se produce un rozamiento constante entre la Tierra en rotación y los abultamientos debidos a las mareas.

metros sobre una Tierra cubierta uniformemente. Cuando la Luna está en la misma dirección que el Sol, tenemos Luna nueva y cuando está en la dirección opuesta es la Luna llena. De este modo, las mareas se suman en Luna nueva y en el plenilunio, formando lo que se llaman las mareas vivas. Pero cuando la Luna está en los cuartos crecientes y menguantes, el mar se eleva por la acción de la Luna,

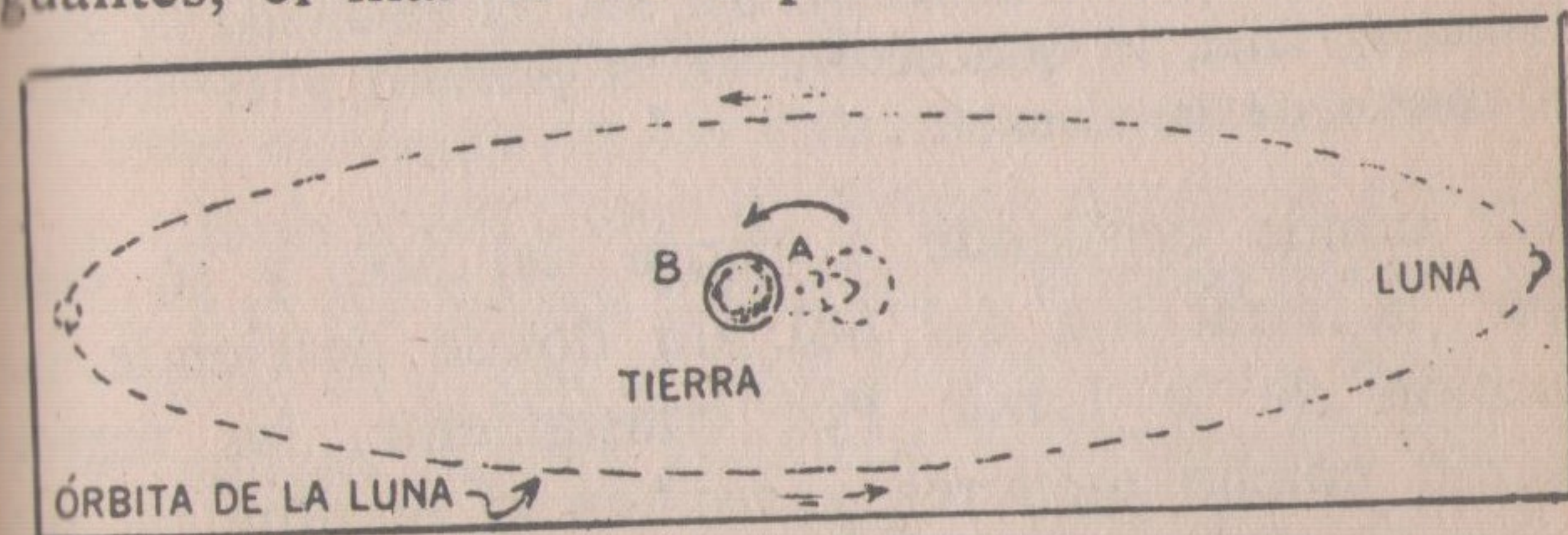


FIG. 46. Por qué hay dos mareas por día. La Tierra no solamente atrae a la Luna, sino que también es atraída por ésta. Por eso, también la Tierra describe un círculo que, debido a su mayor masa, es mucho menor que el círculo descrito por la Luna. En este mo-

vimiento circular de la Tierra, el lado B, por hallarse más lejos del centro del círculo, experimenta la mayor fuerza centrífuga, mientras que el lado A, por estar más cerca de la Luna, sufre la atracción mayor. Las dos fuerzas se equilibran en el centro de la Tierra. Esa fuerza centrífuga origina una marea en B, al mismo tiempo que la gravitación produce una marea en A.

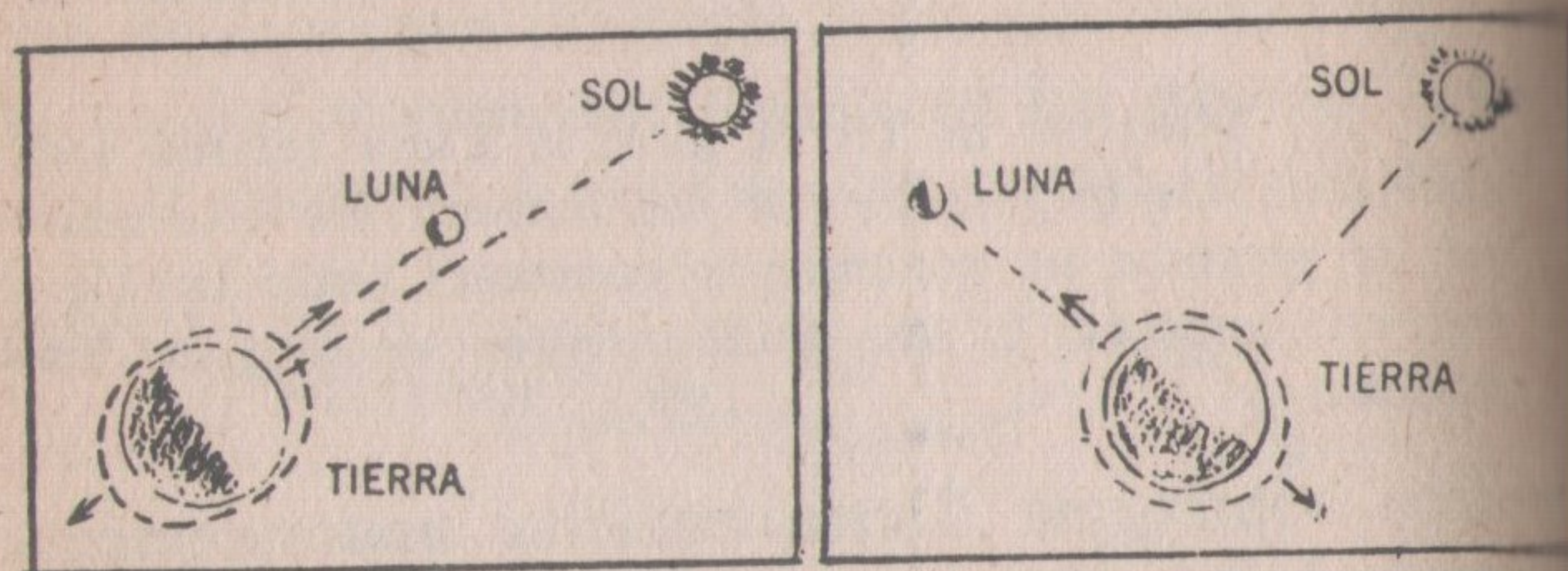


FIG. 47. Las mareas de aguas vivas (izquierda) son producidas por la atracción conjunta del Sol y la Luna, lo que da origen a una marea alta. Esto ocurre cuando hay Luna nueva y Luna llena. Las marcas de aguas muertas (derecha) se producen cuando el Sol y la Luna forman con la Tierra un ángulo recto. En tal caso, la marea alta debida a la atracción de la Luna disminuye por la atracción del Sol. El resultado es una marea baja, lo que ocurre en el primero y el último cuarto de la Luna.

allí donde desciende a causa del Sol, y se eleva por la atracción del Sol allí donde desciende por acción de la Luna. Por consiguiente, las mareas serán mucho menores y reciben el nombre de mareas muertas.

Razón de las mareas altas

Es un gran desengaño que la teoría de las mareas

solo nos permita inferir una elevación máxima de las aguas oceánicas de 60 centímetros, pues todos sabemos que hay mareas mucho más altas. Pero, éstas se deben a la curiosa interacción de la tierra firme y el mar, a causa de las líneas costeras extraordinariamente complicadas que se extienden por toda la Tierra. Solo conocemos las mareas alrededor de las líneas costeras. Es sumamente difícil medir la altura de las mareas en medio del océano. Sin embargo, hay pocas razones para suponer que difieren mucho del máximo de 60 centímetros predichos por la teoría. Las mareas alcanzan gran altura si la línea costera tiene una forma tal que el agua, al elevarse, queda atrapada en canales que se van estrechando. Un ejemplo particularmente bello de esto es la Bahía de Fundy, la parte del océano que está entre Nueva Brunswick y Nueva Escocia. Por su forma de embudo, las mareas en la cabecera de la bahía se elevan a más de 12 metros. Es la marca conocida más alta del mundo, aunque en muchos puntos fuera de la bahía — en las costas del Estado de Massachusetts — las mareas son muy pequeñas. Similarmente, las mareas son particularmente elevadas en los extremos orientales del Paso de Calais y del Canal de Brístol, donde se precipitan sobre el río Severn y forman el famoso Severn Bore, el punto en el que el agua remonta el río. Es así que las mareas pueden aumentar enormemente con una forma apropiada de la línea costera. En cambio, en un mar relativamente pequeño y rodeado de tierra firme, como el Báltico o el Mar Negro, dado que prácticamente todo el mar está al mismo tiempo en la pleamar o la bajamar y como no pasa suficiente

agua a través del estrecho como para elevar o disminuir el nivel del agua, virtualmente no hay mareas.

Fricción debida a las mareas

Un importante efecto de las mareas es la llamada fricción de marea. Concentrémonos por un momento en las mareas debidas a la Luna y echemos una mirada de conjunto al aspecto que presentaría la Tierra si estuviera cubierta totalmente por las aguas oceánicas. Habría protuberancias debidas a las mareas, que sobresaldrían de la Tierra sólida en rotación por debajo de las aguas. Es decir, algunas partes del océano quedarían atrás, con respecto a la rotación de la Tierra, por la atracción que sobre ellas ejercería la Luna. Según esto, la Tierra, en su rotación diaria, se restregaría contra estas protuberancias debidas a las mareas, de lo que surgirían efectos de fricción. La Tierra tendería a arrastrar las protuberancias hacia adelante, en la dirección de su rotación, y a su vez las protuberancias tenderían a retardar la rotación de la Tierra en su conjunto. Si se hace el cálculo de este efecto, no solamente para la marea lunar, sino también para la solar, se halla que la fricción es muy escasa allí donde el océano es profundo. En otras palabras, el agua es un lubricante muy bueno allí donde es profunda. Solamente donde el mar es bajo puede surgir la fricción de marea. Pero, si el mar es bajo y, además, está rodeado de tierra firme, como en el caso del Bál-

tico, puesto que no hay mares tampoco habrá fricción de marea. Hay extensiones del océano, como el Mar de Irlanda, que tienen grandes mareas y en las que el agua es poco profunda; es en estas zonas donde la fricción de marea es mayor. La fricción de marea produce dos efectos importantes. Uno de ellos es que, puesto que los abultamientos son arrastrados hacia adelante en el sentido de la rotación de la Tierra, tienden a acelerar el movimiento de la Luna en su órbita y, con el tiempo, alejarán un poco a ésta de la Tierra. Dicho de otro modo, las protuberancias de las mareas, arrastradas hacia adelante por la rotación de la Tierra, tienden a comunicar parte de esta rotación al movimiento de la Luna en su órbita. El otro es que, indudablemente, esta fricción de marea tenderá a retardar la rotación de la Tierra. Un cálculo rápido demuestra que en los últimos dos mil millones de años, las mareas del océano produjeron bastante fricción como para retardar el tiempo de rotación de la Tierra alrededor de su eje de unas ocho horas hasta las actuales veinticuatro.

Mareas atmosféricas

Las mareas del océano no son el único efecto de las fuerzas de marea. Ese efecto se manifiesta, si bien en muy pequeña medida, en la tierra sólida misma, que se deforma un poco bajo las tensiones debidas a las fuerzas generadoras de mareas; en años recientes fue posible medir la deformación de la tierra sólida por la acción de las mareas. Pero mucho

mayor es el efecto de las fuerzas de marea sobre la atmósfera terrestre. Es indudable que la capa de aire que rodea a la Tierra puede ser considerada como una especie de océano; por consiguiente, es de esperar que, al igual que los mares, suba y baje con la marea. Como la atmósfera cubre uniformemente la Tierra, la situación es mucho más simple que en el caso del océano, que va a chocar contra tantas costas. En cambio, es mucho más fácil observar la superficie del océano que la parte superior de la atmósfera (o, al menos, lo *era* antes de que los Estados

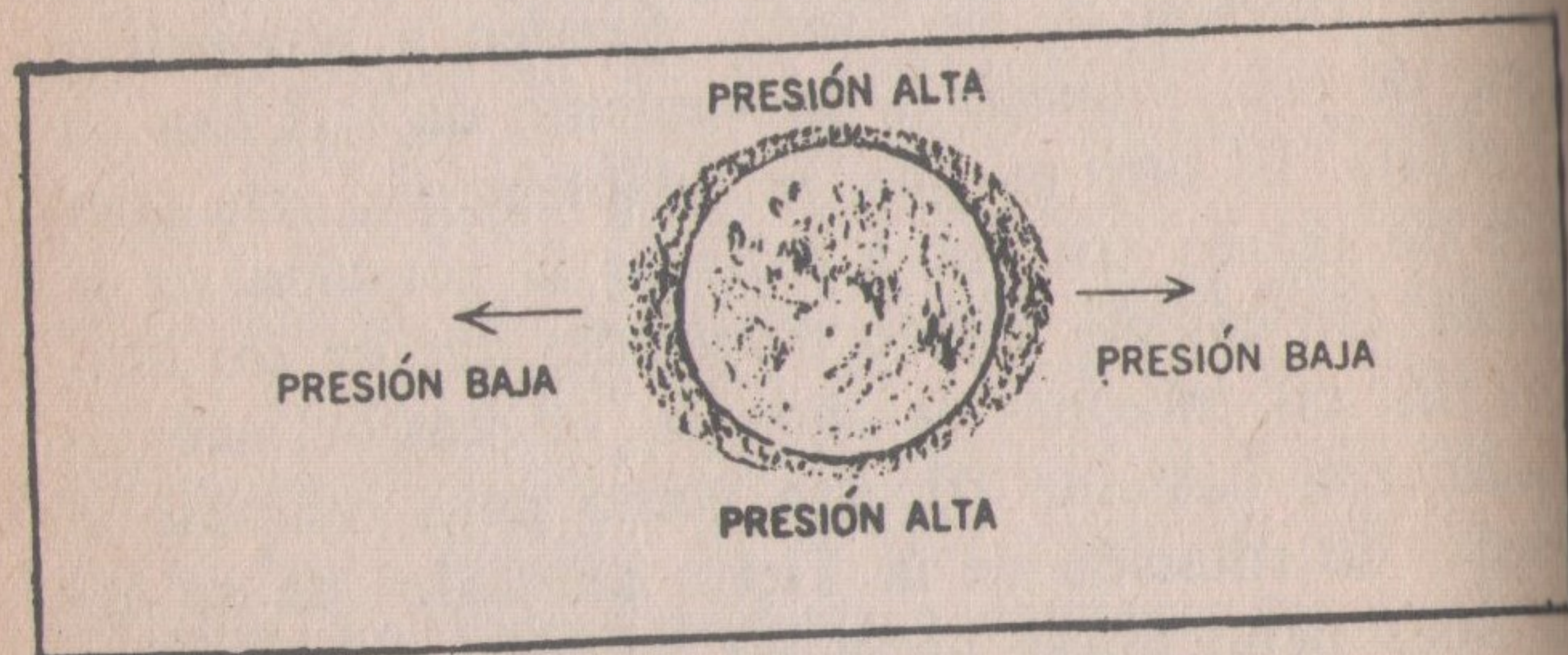


FIG. 48. El Sol y la Luna también provocan mareas en nuestra atmósfera, al atraerla en direcciones opuestas del mismo modo que con el agua.

Unidos lanzara el satélite meteorológico Tiros I). La única manera de que podamos estudiar apropiadamente la parte superior de la atmósfera es mediante la observación del barómetro. Éste nos dice cuál es la presión del aire, esto es, cuál es el peso del aire por encima del barómetro. Desgraciadamente, como

todos sabemos, hay demasiadas variaciones meteorológicas irregulares que provocan fluctuaciones en el barómetro. Sin embargo, si se estudian las más pequeñas oscilaciones del barómetro durante largos períodos y se promedian todas las oscilaciones que no corresponden a la frecuencia de las mareas, es posible llegar a medir éstas. Cuando se estudió este tema por primera vez, hace unos treinta años, se halló que una de las mareas solares provocaba fluctuaciones del barómetro mucho mayores que las que se habían supuesto. ¿Cómo podía explicarse este curioso fenómeno? La atmósfera superior no puede encauzarse en canales como los mares, a causa de una línea costera de forma adecuada. La única explicación posible era que la atmósfera estaba en resonancia.

Resonancia de mareas

La resonancia es un fenómeno muy importante dentro de la física. Se refiere al hecho que aun una fuerza pequeña puede llegar a trasmitir otra muy grande si se la aplica repetidamente en el momento preciso en que la oscilación de un cuerpo la hace más efectiva. Un impulso repetido dado a un columpio, puede hacerlo llegar muy alto, aun cuando el impulso sea pequeño, siempre que se lo aplique en el momento oportuno, esto es, en el momento en que el columpio va justamente en la dirección del impulso. En este caso, decimos que el columpio está

en resonancia con la fuerza, con el impulso. La única explicación de la elevada marea atmosférica es que el "impulso" de las fuerzas de marea se aplica siempre en el momento adecuado para aumentar una oscilación natural de la atmósfera. Tenemos que examinar, pues, las oscilaciones naturales de la atmósfera.

Un hecho que surgió claramente hace treinta años es que la atmósfera solo puede estar en resonancia con las fuerzas generadoras de marea si la parte superior de ella tiene partes mucho más calientes de lo que se creía por entonces, época en la que se suponía que toda la atmósfera era sumamente fría. Pero, es posible demostrar que solamente una atmósfera con una capa alta relativamente cálida puede resonar con la marea solar y, así, dar origen a las altas mareas observadas. Las recientes investigaciones realizadas por medio de globos y cohetes confirmaron el descubrimiento, hecho en un principio sobre la base de las fluctuaciones del barómetro, de que hay una zona de la atmósfera superior más caliente, comparativamente, que el resto. Hace poco, se ha formulado una hipótesis muy interesante en relación con las mareas atmosféricas. Como hemos visto, la fluctuación del océano debida a las mareas ha retardado la rotación de la Tierra, de modo que la longitud del día —que quizá solo era de ocho horas en un principio— se alargó hasta alcanzar las veinticuatro horas actuales. Como es lógico, cuando la extensión del día era diferente, las mareas de la atmósfera se producían a intervalos más cortos y no podía haber resonancia.

Por consiguiente, las mareas no eran muy grandes.

Se ha sugerido que es una extraña coincidencia que sea precisamente ahora cuando la longitud del día es tal que da origen a la resonancia. Pero no se trata de ninguna coincidencia. Se ha demostrado que se ejerce sobre la Tierra una fuerza que contrarresta la fricción de marea de los océanos; esa fuerza se origina en la resonancia y en el calentamiento y enfriamiento diarios de la atmósfera debidos al Sol. Esa fuerza tiende a mantener la duración del día en su valor actual y no permite que las mareas oceánicas la prolonguen. Si esta teoría es correcta, entonces la aparición de esa resonancia no es ninguna coincidencia. Por el contrario, probablemente la duración del día no ha aumentado en muchísimo tiempo. La idea es que, si bien los días se hicieron cada vez más largos durante mucho tiempo, cuando su duración llegó a las veinticuatro horas —cosa que puede haber ocurrido hace mucho tiempo— la curiosa combinación de la resonancia de la atmósfera con su calentamiento diario hizo que la extensión del día se mantuviera en veinticuatro horas y lo mantendrá en esta duración durante largo tiempo.

Capítulo 12

Tierra: movimiento y magnetismo

Cuando se toman en consideración todos los detalles pequeños, el cuerpo de la Tierra, en conjunto, se mueve de una manera extraordinariamente complicada. Los movimientos principales, la rotación diaria y la revolución de la Tierra alrededor del Sol en su órbita anual son bien conocidos. Pero hay muchos otros movimientos menores que también tienen considerable importancia. Uno que ya hemos mencionado es el movimiento de la Tierra y de la Luna alrededor de su centro común de masa. Aunque a la Luna le cabe la tarea de realizar la mayor parte de este movimiento, por su masa mucho menor, también la Tierra se ve afectada por él. La mayoría de los otros movimientos pequeños se deben al hecho que la Tierra no es una esfera perfecta, sino que presenta una protuberancia alrededor del Ecuador, y es más abultada alrededor del mismo, porque la fuerza centrífuga de la rotación diaria ha estirado su masa en esa zona. Como resultado de estos, el diámetro ecuatorial de la Tierra es unos 45 kilómetros más largo que el diámetro polar. Un cuerpo de este tipo, aunque se encuentre aislado en el espacio, se mueve de una manera muy curiosa.

Balanceo del eje de la Tierra

Debido al abultamiento ecuatorial de la Tierra, hay un eje geométrico definido que es el diámetro más corto. Mientras el cuerpo gire alrededor de este

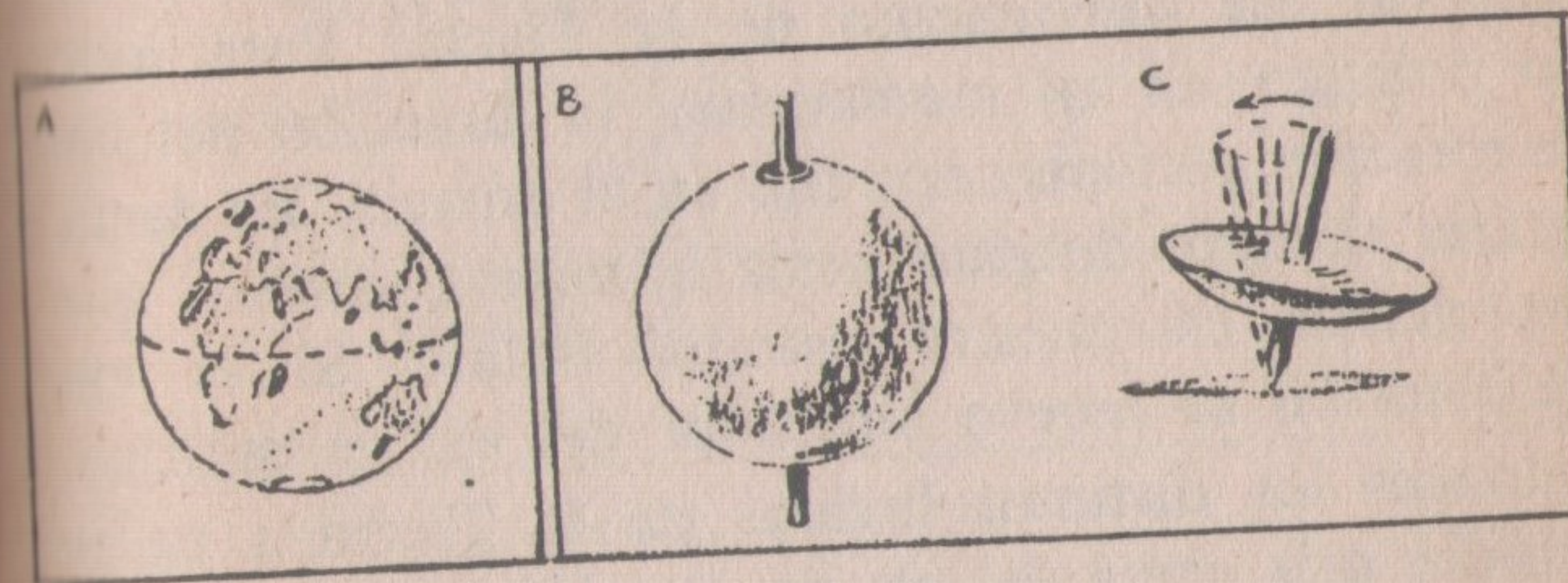


FIG. 49. La Tierra no es una esfera perfecta, sino que presenta un ligero abultamiento en el Ecuador, originado por la fuerza centrífuga de su rotación diaria. Por eso, su diámetro ecuatorial es 45 kilómetros mayor que el diámetro polar. No es una diferencia muy grande, si consideramos que el diámetro total de la Tierra es de 12.700 kilómetros. Se puede comparar esto con los movimientos de una esfera que gira alrededor de un eje con un soporte dilatado: en tal caso se produce un ligero balanceo de la esfera. La dilatación ecuatorial de la Tierra es suficiente para imprimir a ésta un ligero balanceo en su rotación. Este balanceo se parece también a los movimientos de un trompo cuando está por detenerse.

diámetro, su movimiento es completamente homogéneo, como puede demostrarse mediante la teoría de la rotación de los cuerpos perfectamente rígidos. Pero, si un cuerpo rígido de esta forma es perturbado ligeramente, de modo que no gire constantemente alrededor de su eje geométrico, se origina un movimiento muy complejo. En este movimiento, el eje de rotación está siempre a la misma distancia del eje geométrico; pero se mueve alrededor de él en un período que, en el caso de la Tierra, suponiendo que ésta sea perfectamente rígida, es de poco más de 300 días, según puede calcularse. ¿Cómo podemos observar ese movimiento de la Tierra? Para todo fin práctico, en tal movimiento, la dirección del eje de rotación permanecería fijo en el espacio. Es decir, estaría siempre dirigido hacia la misma estrella, que suponemos es nuestra estrella Polar. Si el eje de rotación se mueve alrededor del eje geométrico, entonces los distintos lugares de la Tierra a veces estarán más cerca del eje de rotación y a veces más lejos de él. Según esto, la estrella Polar, en un lugar determinado de la Tierra, a veces aparecerá alta en el cielo y a veces un poco más abajo. La altura de la estrella Polàr es lo que llamamos latitud geográfica. En un movimiento semejante de la Tierra, la latitud de cada lugar fluctuaría en períodos de unos 300 días.

Durante muchos años se trató de determinar este movimiento, la variación de la latitud, hasta que fue descubierto a fines del siglo pasado. Este movimiento era sumamente difícil de descubrir, en parte

porque era muy pequeño y en parte porque era mucho menos regular de lo que se suponía. El movimiento es, indudablemente, muy pequeño. En este extraño balanceo, el polo del eje de rotación de la Tierra solamente se mueve unos 6 ó 9 metros. Es decir, las latitudes de los distintos lugares de la Tierra solamente varían en una pequeña fracción de un segundo de arco. Pronto se vió que el movimiento era tan complicado y tan irregular que era necesario registrarlo exactamente. Con este fin, se

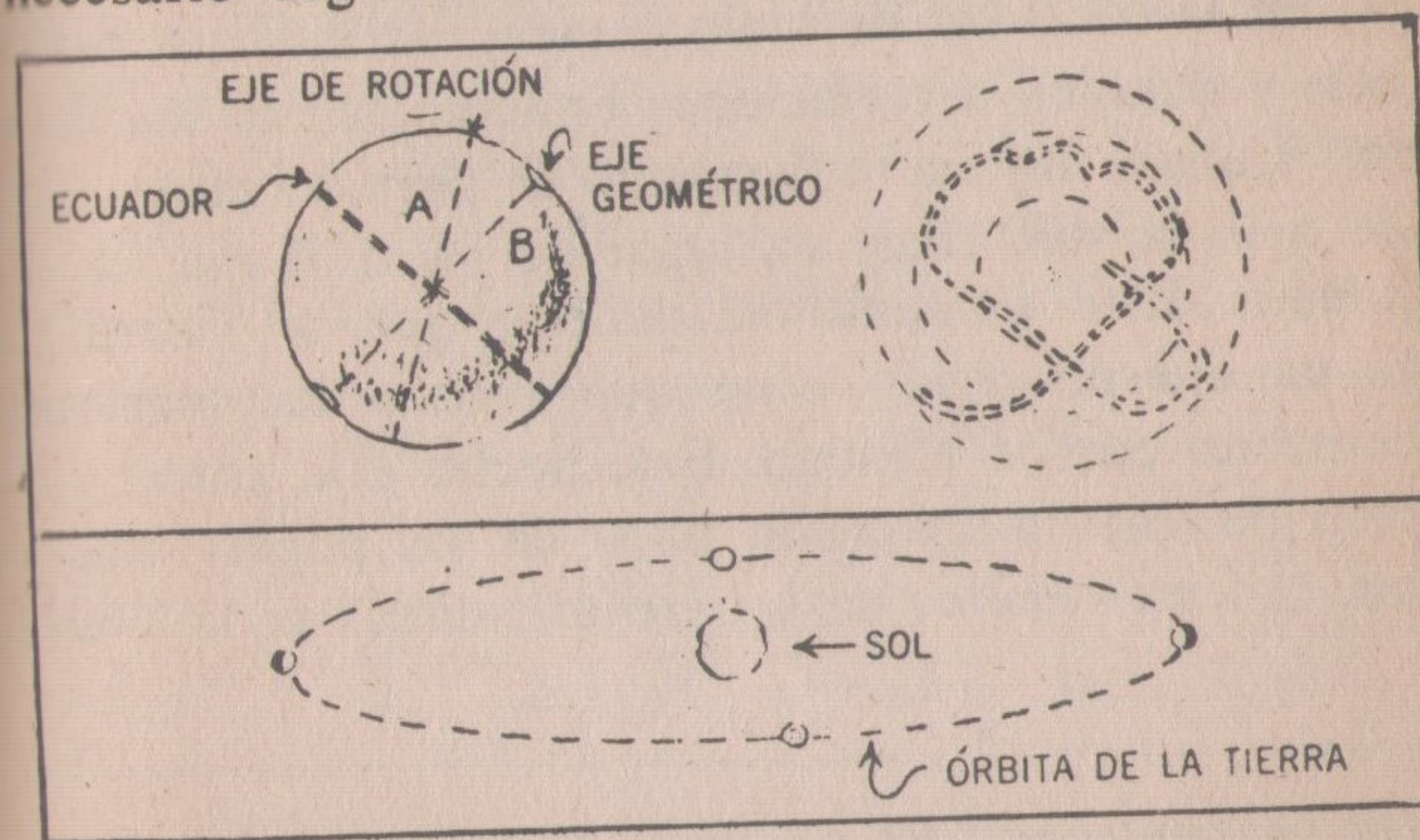


Fig. 50. En el curso de un año, el eje de rotación de la Tierra oscila alrededor del diámetro más corto, del eje geométrico, y sigue un trazo complejo alrededor del polo. El ángulo entre A y B se halla exagerado en el diagrama. Visto desde arriba del Polo Norte, el eje de rotación se mueve alrededor del eje geométrico de una manera muy complicada.

establecieron por toda la Tierra una serie de observatorios internacionales de latitudes. Estos observato-

rios han estado en funcionamiento durante muchas décadas y el resultado de su labor sobre la variación de la latitud suministra un cuadro extraordinariamente complicado del movimiento del eje de la Tierra. Aunque pequeño, este movimiento puede suministrar importantes datos acerca de la estructura de la Tierra. El análisis de las observaciones es enormemente intrincado y los resultados son difíciles de comprender. En parte, la oscilación del eje de la Tierra se debe, indudablemente, a cambios estacionales en la cantidad de hielo y nieve de diversas regiones, y también a variaciones estacionales en los vientos. Luego, hay un movimiento de período muy largo, de más de 400 días, en lugar de los 300 que se suponían. Este aumento se debe a que la Tierra no es un cuerpo rígido, sino que cede a las tensiones como un cuerpo elástico. Este hecho y la amortiguación del movimiento son unos de los pocos indicios que tenemos acerca de las profundidades de la Tierra.

Desplazamientos del eje de la Tierra

Otro movimiento importante es el llamado precesión del eje de la Tierra. Es bien sabido que el eje de la Tierra no forma ángulos rectos con el plano en el que se mueve alrededor del Sol y que esta inclinación es la causa de las estaciones. En el hemisferio Norte, durante el verano tenemos el Sol alto en el cielo, mientras que seis meses más tarde, el Sol está alto en el cielo del hemisferio Sur y nosotros,

en el Norte, estamos en invierno. Si la Tierra fuera una esfera perfecta, el Sol o cualquier otro cuerpo no podría hacer dar vueltas a la Tierra de ningún modo por atracción gravitacional, pues una esfera es muy resbaladiza en un sentido gravitacional. Pero la Tierra presenta una dilatación alrededor del Ecuador. El Sol y la Luna, por su atracción gravitacional, tiran de esa protuberancia ecuatorial hacia el plano del movimiento de la Tierra alrededor del Sol (que es también, aproximadamente, el plano de la órbita de la Luna alrededor de la Tierra). Procuran enderezar el eje de la Tierra, o sea, ejercen una fuerza que tiende a disminuir su inclinación. Si la Tierra no girara alrededor de su eje, si no tuviera su rotación diaria, esas fuerzas producirían tal resultado.

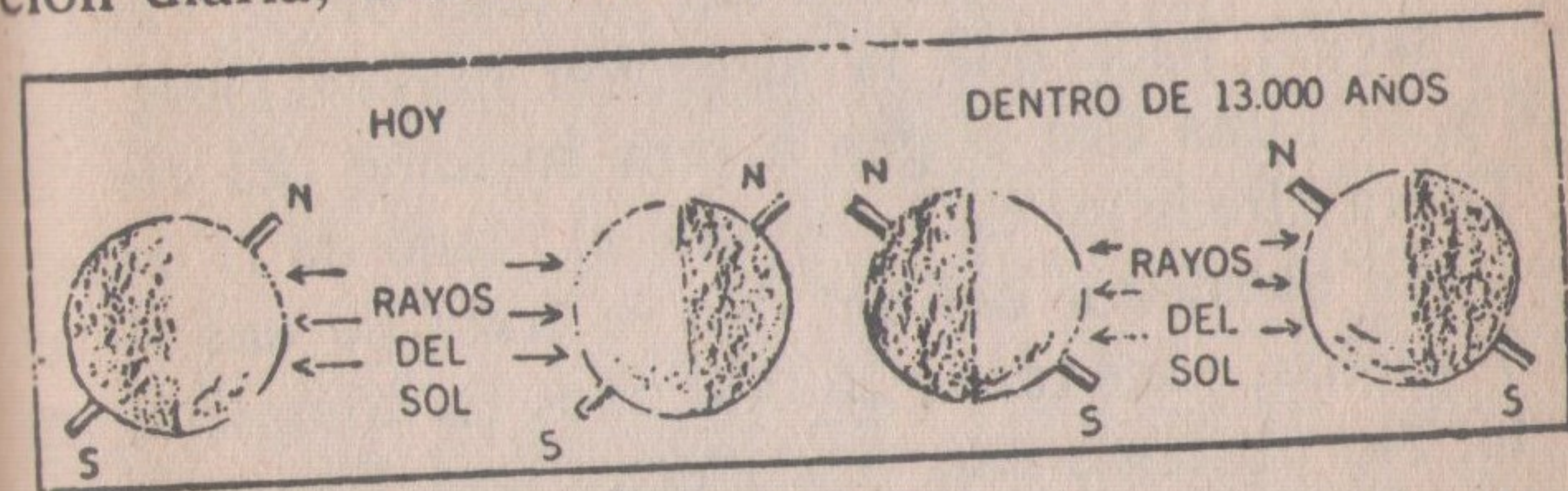


FIG. 51. **La precesión del eje de la Tierra: Dentro de 13.000 años las estaciones se invertirán, como resultado de la atracción del Sol sobre la dilatación ecuatorial de la Tierra. En el diagrama que representa lo que ocurre "hoy", la figura de la izquierda muestra el hemisferio norte de la Tierra dirigido hacia el Sol durante el verano septentrional; la figura de la derecha muestra el verano austral y el invierno septentrional. En el cuadro "dentro de 13.000 años", el eje de la Tierra ha girado 90 grados y las estaciones se han invertido. A la izquierda está representado el verano austral y a la derecha el verano septentrional.**

Pero un cuerpo en rotación reacciona de extraña manera a las fuerzas que tratan de cambiar su eje de rotación. Esto puede verse fácilmente si ponemos una bicicleta con las ruedas hacia arriba, de manera que descanse sobre la silla, hacemos girar una de las ruedas y luego tratamos de mover su eje. Veremos entonces que reacciona de manera completamente inesperada, pues se volverá en una dirección situada en ángulo recto a aquélla en la que queríamos desviarla. Estas curiosas fuerzas de los cuerpos en rotación son el fundamento del trompo, uno de los juguetes preferidos de los niños, y también de la valiosa brújula giroscópica que, en muchas aplicaciones prácticas, ha remplazado a la brújula magnética como ayuda para la navegación. En el caso de la Tierra, su rotación hace que la atracción gravitacional del Sol y la Luna den origen a otra rotación del eje de la Tierra alrededor de la normal al plano de la órbita terrestre alrededor del Sol. No se trata de una rotación rápida, pues tarda 26.000 años en completar un ciclo. No obstante ello, sus efectos son importantes: hacen que el eje de la Tierra no señale siempre la misma estrella, sino que describa un círculo en el cielo cada 26.000 años. Así la Estrella Polar de nuestra época no es la misma que la de los antiguos griegos o romanos, pues por entonces el eje de la Tierra no se hallaba dirigido en la dirección de ninguna estrella particularmente brillante. Las constelaciones que son visibles actualmente en las noches correspondientes a los días en que el Sol está alto en el cielo, eran visibles por aquel entonces en una

época del año que difería en un mes de la actual. Cualquier astrónomo que quiera estudiar las investigaciones de los antiguos griegos en astronomía, o las de los antiguos egipcios o babilonios, tiene que tomar en cuenta el cambio en la dirección del eje de la Tierra.

Fuente del magnetismo terrestre

Acabamos de hacer referencia a la brújula magnética. El funcionamiento de este instrumento se basa en el magnetismo de la Tierra. Durante cientos de años la gente se preguntó desconcertada cómo es posible que este enorme cuerpo sea magnético. Sabemos, claro está, que ciertos tipos de hierro pueden ser magnéticos, pero el hierro solo constituye una parte muy pequeña de las capas exteriores de la Tierra. Además, aun cuando hubiera bastante hierro como para producir el magnetismo, quedaría aún por saber cómo llega a magnetizarse. Actualmente, sabemos con alguna seguridad, que no hay bastante hierro como para explicar el magnetismo terrestre, y también que no muy lejos de la superficie la temperatura es tan alta, que el hierro pierde sus propiedades magnéticas.

La otra forma única en que puede producirse magnetismo es por la electricidad. En ingeniería hay muchos ejemplos de ello, como los grandes electroimanes que se usan en algunas grúas, como los motores eléctricos (todos los cuales trabajan sobre principios magnéticos) y como el familiar timbre eléctri-

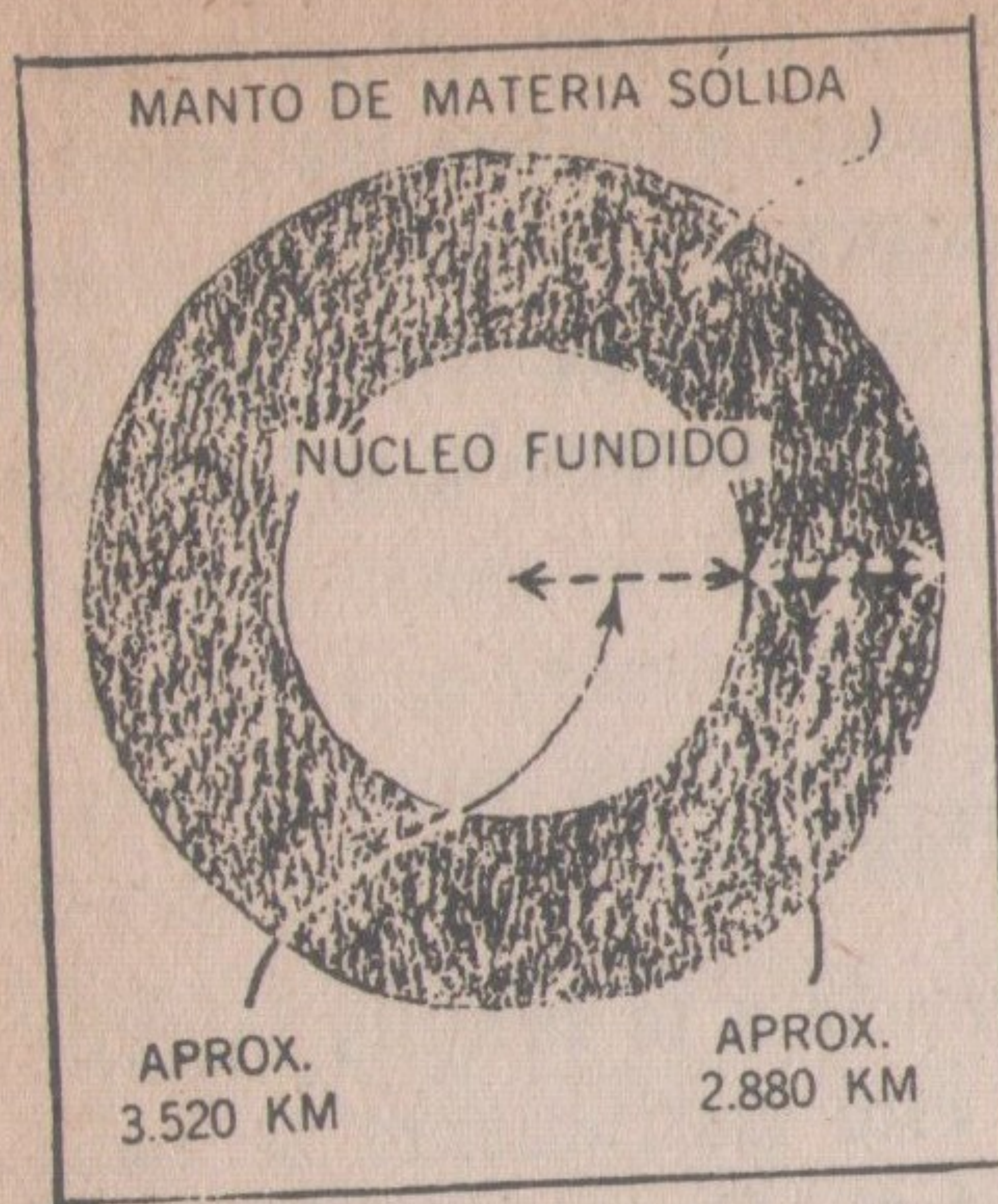




FIG. 52. Aún no se conoce muy bien la causa del magnetismo terrestre. Sin embargo es muy probable que se deba al gran núcleo líquido de la Tierra, que puede producir corrientes eléctricas de magnitud suficiente como para crear ese campo magnético. Este campo magnético de la Tierra se extiende a gran distancia en el espacio y es cada vez más débil a medida que aumenta la lejanía. Para los seres humanos, tal campo magnético reviste gran importancia. Él gobierna la brújula, tan útil para los navegantes: modifica las capas conductoras de la ionósfera, que nos permiten enviar mensajes de radio de larga distancia; y también contribuye a protegernos de los rayos cósmicos.

co, en el que se interrumpe un contacto mediante fuerzas magnéticas. Pero ¿dónde pueden originarse las corrientes, las enormes corrientes eléctricas que se necesitan para mantener el campo magnético terrestre? El único lugar concebible es el núcleo líquido de la Tierra que se extiende desde cerca del centro hasta más de la mitad del radio terrestre. Por las

investigaciones sobre las ondas sísmicas se sabe que esa región es de naturaleza líquida. ¿De qué manera puede esto ayudarnos a comprender los orígenes de las corrientes eléctricas que debemos suponer para explicar la creación del campo magnético terrestre? Para tener corrientes eléctricas es necesario generarlas de alguna manera, por ejemplo, en las dínamos de una usina eléctrica. Una propiedad esencial de la dínamo es que tiene partes en movimiento. No es desatinado suponer que hay movimiento en el núcleo líquido de la Tierra. Pero otra propiedad importante de las dínamos es que están construidas de una manera sumamente elaborada, mediante cables en los que la electricidad puede fluir fácilmente y con materiales aisladores a través de los cuales no puede pasar la electricidad. Por otro lado, la materia que se encuentra en el núcleo de la Tierra es completamente conductora, o así lo suponemos al menos basados en nuestras teorías. Esa materia soporta una presión mucho mayor de la que podemos producir en nuestro laboratorios, pero los físicos consideran razonable atribuir una elevada conductividad eléctrica a esa materia. Se plantea, pues, el problema de saber cómo puede constituir una dínamo un material que es totalmente conductor, y sin la compleja red de conductores y aisladores que tienen las dínamos de las usinas eléctricas.

Ha resultado que este problema es de la mayor complejidad matemática y solo muy recientemente se hicieron algunas sugestiones apropiadas acerca de cómo tendría que moverse un líquido totalmente con-

ductor para poder generar corrientes eléctricas. Una vez que se haya resuelto por completo este problema, debemos resolver todavía el relativo a por qué el fluido del núcleo de la Tierra se mueve de manera tal que da origen a corrientes eléctricas y, con éstas, a un campo magnético. Se han emitido dos hipótesis relativas al origen de estos movimientos. Según una de ellas, en el núcleo de la Tierra hay suficiente material radiactivo como para generar una cierta cantidad de calor. Este calor solo puede evadirse si todo el material está en constante movimiento, como el agua en una cacerola poco antes de hervir. La otra hipótesis se relaciona con algo que hemos mencionado en la primera parte de este capítulo, o sea que la Tierra está sujeta a movimientos sumamente complicados, incluida la precesión del eje. Conocemos estos movimientos solamente a través del manto sólido de la Tierra, pero su núcleo fluido tiene que ajustarse de algún modo a esos complejos movimientos del caparazón que lo contiene. Estos intentos del núcleo líquido por adaptarse a los movimientos de la corteza tienen que dar origen a movimientos dentro del líquido, y es de imaginar que sean justamente éstos los movimientos que se necesitan para generar las corrientes eléctricas que, a su vez, dan origen al campo magnético terrestre.

Hay algunos indicios disponibles acerca de todos estos problemas. Ante todo, está el hecho curioso que los polos magnéticos de la Tierra no se encuentran exactamente en donde están los polos geográficos, pero no están muy lejos de ellos. ¿Por qué debe estar el eje magnético casi en la misma línea que el eje de rotación de la Tierra, aunque no coincida exactamente con éste? Quizá si comprendiéramos mejor los movimientos en el núcleo de la Tierra estaríamos más cerca de conocer la respuesta a este interrogante. En segundo término, disponemos de curiosos indicios, hallados en los últimos años mediante exámenes minuciosos del magnetismo de rocas muy antiguas, de que hace mucho tiempo, durante ciertos períodos geológicos, el campo magnético de la Tierra tenía una dirección diferente de la actual. Si el origen de éste está en el núcleo líquido, podemos comprender cómo puede haber cambiado en largos períodos, aunque todavía estaríamos lejos de una comprensión completa del fenómeno. Pero, de todos modos, los resultados hablan en favor de la teoría según la cual el núcleo fluido sería el responsable de las corrientes eléctricas que crean el campo magnético terrestre, y no en favor de la suposición de que este campo se debe a las rocas de hierro fijas.

Hemos dicho lo suficiente como para indicar con claridad cuán desconcertante es el campo magnético de la Tierra. Cuando peregrinamos a través del espacio, como hemos hecho en este libro, y hallamos para nuestra gran sorpresa que hay algunas características de cuerpos muy alejados, como las estrellas, que al parecer, comprendemos bastante bien, es un saludable correctivo para cualquier exceso de confianza el saber que muy cerca de nosotros, en el centro de la Tierra, hay muchos más interrogantes que respuestas y trabajo suficiente como para tener ocupadas a muchas generaciones de científicos.

Índice alfabético

Índice

Este libro se terminó de imprimir en los talleres de
Industria Gráfica del Libro S.R.L., Warnes 2383,

Buenos Aires, setiembre de 1980.

Tirada 3.000 ejemplares

¿Qué extensión tiene el universo? ¿Cuál es la edad de las estrellas y las galaxias? ¿Por qué, si la cantidad de estrellas que existen es innumerable, la noche es oscura? ¿De dónde viene y a dónde va el universo?

He aquí algunos de los temas apasionantes que Hermann Bondi aborda en *El cosmos*, una obra que trata con rigor y brillantez las conquistas de la astronomía moderna y en la que el lector aficionado a ella se encuentra no sólo con la explicación de fenómenos naturales corrientes, tales como las mareas y el magnetismo terrestre, sino también con la exposición de trabajos de tanta trascendencia como los de Einstein, Eddington y Hoyle.

Hermann Bondi, profesor de matemática aplicada del King's College, estudió en el Trinity College y fue catedrático en Cambridge. Ha sido, además, investigador adjunto en Cornell y Harvard. Realizó importantes investigaciones sobre la composición de las estrellas y del espacio interestelar, así como sobre cosmología y geofísica, cuyas conclusiones plasmó en su obra *Cosmology* y en otras publicaciones.

EUDEBA